



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus-ja maaehitusinstituut  
Maaehituse osakond

**Taavet Tamm**

**HALLIST LEPAST LIIMPUITTALADE  
TUGEVUSOMADUSTE UURIMINE**  
INVESTIGATING THE STRENGTH PROPERTIES OF GLUE  
LAMINATED TIMBER MADE OF GREY ALDER

Magistritöö  
Maaehituse õppekava

Juhendaja: nooremteadur Martti-Jaan Miljan

**Tartu 2017**

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Taavet Tamm		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Hallist lepast liimpuittalade tugevusomaduste uurimine			
Lehekülgi: 79	Jooniseid: 24	Tabeleid: 13	Lisasid: 10
Osakond:		Maaehituse osakond	
Uurimisvaldkond:		Puitkonstruktsioonid	
Juhendaja:		Martti-Jaan Miljan	
Kaitsmiskoht ja aasta:		Tartu 2017	
<p>Hall lepp (<i>Alnus incana</i>) on Eesti metsades väga laialdaselt levinud, kuid vähe väärtustatud puuliik. Arvestades halli lepa suurt ressursi, oleks vaja leida sellele puuliigile uusi rakendusi. Käesolevas töös uuritaksegi halli lepa sobivust liimpuidu valmistamiseks, keskendudes tema tugevusomadustele nii paindel kui ka survel ristikiudu. Lisaks uuritakse halli lepa vigadeta puidu tugevusomadusi ning nende seost tihedusega, kuna nendest näitajatest sõltuvad ka liimpuidu omadused.</p> <p>Käesolevas töös on loodud halli lepa liimpuidust katsekehad ning nendega läbiviidud purustavate katsete tulemusel määratud kindlaks halli lepa peamised tugevusomadused; samuti analüüsitakse ja võrreldakse neid omadusi ka teiste sarnaste puuliikide liimpuidu omadustega ning standardis määratud liimpuidu omadustega.</p> <p>Halli lepa liimpuittaladega teostati paindekatsed ja survekatsed ristikiudu vastavalt EVS-EN 408:2010+A1:2012. Paindekatsetes kasutati 11 liimpuittala mõõtmetega 95 x 150 x 3000 mm<sup>3</sup>. Liimpuit valmistati 27 mm paksustest D18 tugevusklassi kuuluvatest lamellidest. Liimiks kasutati polüuretaanalusel liimi Makroplast UR 7225.</p> <p>Paindekatsed halli lepa liimpuiduga teostati Eesti Maaülikooli konstruktsioonide laboris. Kasutati nelja punkti paindekatse skeemi. Paindekatsete tulemusel saadi keskmiseks paindetugevuseks (<math>f_{m,g}</math>) 40,38 N/mm<sup>2</sup> ning normväärtuseks (<math>f_{m,g,k}</math>)</p>			

29,25 N/mm<sup>2</sup>. Saadud tulemused on suuremad, kui eeldatud halli lepa liimpuidu paindetugevus. Samuti on ka paindetugevuse keskmine väärtus oluliselt suurem, kui varem teistes töödes uuritud kuuse liimpuidu keskmine väärtus. Ainsa miinusena on leitud halli lepa liimpuidu paindetugevuse suur varieeruvus, mis on tingitud okste sattumisest tala tõmbetsooni.

Kuna katsetulemustest selgus, et halli lepa puit on liimpuidu tootmiseks sobilik ning tugevusomadused vastavad standardites ettenähtule, planeerib OÜ Nordlum, kellega koostöös liimpuit valmistati, hakata edaspidi oma toodetes kasutama ka hallist lepast tehtavat liimpuitu.

Märksõnad: liimpuit, hall lepp, *Alnus incana*, puit.

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Taavet Tamm		Specialty: Civil Engineering	
Title: Investigating the Strength Properties of Glue Laminated Timber Made of Grey Alder			
Pages: 79	Figures: 24	Tables: 13	Appendixes: 10
Department:		Department of Rural Building	
Field of research:		Timber Constructions	
Supervisors:		Martti-Jaan Miljan	
Place and date:		Tartu 2017	
<p>Grey alder is a very widely spread species of tree in Estonia, however extremely undervalued. Taking into consideration the large resource of grey alder, it requires a new field of application. The current thesis investigates the suitability of making glue laminated timber out of grey alder, focusing on its strength properties at static bending, and also at compression perpendicular to grain. Moreover, the thesis concentrates on examining the strength properties of grey alder's clear wood and its connection with density and moisture, hence these being the indicators that conclude the properties of glue laminated timber.</p> <p>The current thesis includes the process of making test pieces of glue laminated timber out of grey alder and by methods of breaking tests, the main strength properties of grey alder were being determined. Furthermore, these properties are being analyzed and compared to the properties of other similar species' glue laminated timber, and also to the standard properties of glue laminated timber.</p> <p>Tests on static bending and compression perpendicular to grain were carried out with glue laminated beams of grey alder according to the standard EVS-EN 408. 11 glue laminated timber beams with measurements of 95 x 150 x 3000 mm<sup>3</sup> were used in bending tests. Glue laminated timber was made out of 27 mm lamellas that belong to strength class D18. The adhesive used was the polyurethane-based Makroplast UR 7225.</p> <p>Bending tests on glue laminated timber made of grey alder were carried out in the laboratory of the Estonian University of Life Sciences. The bending test followed the scheme of four bending points. Test results revealed the average bending strength to be (fm,g) 40,38 N/mm<sup>2</sup> and the characteristic value was (fm,g,k) 29,25 N/mm<sup>2</sup>. The results</p>			



expose the bending strength properties of grey alder's glue laminated timber to be stronger than predicted. Also, the mean value of bending strength is much higher from the mean value of glue laminated timber made of spruce, according to earlier researches on glue laminated timber. The only drawback of glue laminated timber made of alder, is the wide scale of variation of bending strength, yet that is due to the knots which have incurred the beam's tension zone.

Hence the test results proved grey alder to be suitable for making glue laminated timber, and its strength properties meet the requirements of given standards, the lumber industry OÜ Nordlum, in co-operation with whom the glue laminated timber was produced, plans to start using grey alder's glue laminated timber in its products.

Keywords: gluelam, grey alder, *Alnus incana*, timber

# Sisukord

SISSEJUHATUS .....	8
1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....	10
1.1 Hallist lepast üldiselt .....	10
1.1.1 Hall-lepikute leviala ja tagavara Eesti ja Euroopa metsades .....	10
1.1.2 Kasutusvaldkonnad .....	11
1.2 Liimpuit .....	12
1.2.1 Liimpuidust üldiselt .....	12
1.2.2 Tootmine .....	13
1.2.3 Liimpuidu tugevusklassid .....	14
1.2.4 Liimpuidu kasutusvaldkonnad .....	15
1.2.5 Liimpuidu kasutamine Nordlum OÜ-s .....	16
1.3 Puidu füüsilised omadused .....	17
1.3.1 Elastsus ja jäikus .....	17
1.3.2 Paindetugevus .....	18
1.3.3 Survetugevus ja tõmbetugevus .....	19
1.3.4 Tugevusklassi määramine .....	20
1.4 Samas valdkonnas tehtud uurimustööd .....	21
2 KATSETE METOODIKA .....	26
2.1 Hallist lepast liimpuittalade paindekatsed .....	26
2.1.1 Katseseadmed .....	26
2.1.2 Katsekehad .....	26
2.1.3 Katsete käik .....	29
2.2 Liimpuidu survekatsed ristikiudu .....	31
2.2.1 Katseseadmed .....	31
2.2.2 Katsekehad .....	31
2.2.3 Katsete käik .....	32
2.3 Paindekatsed väikeste katsekehadega .....	33
2.3.1 Katseseadmed .....	33
2.3.2 Katsekehad .....	34
2.3.3 Katsete käik .....	34
2.4 Survekatsed ristikiudu väikeste katsekehadega .....	35
2.4.1 Katseseadmed .....	35
2.4.2 Katsekehad .....	36
2.4.3 Katsete käik .....	36
3 KATSETE TULEMUSED JA ANALÜÜS .....	38
3.1 Statistiline andmetöötlus .....	38
3.2 Liimpuittalade painde katsetulemused .....	38
3.2.1 Arvutuslik maksimaalne jõud .....	39
3.2.2 Katsete tulemusel saadud paindetugevus ja elastsusmoodul .....	40
3.3 Liimpuidu survekatsete tulemused .....	43
3.3.1 Ristikiudu survetugevuse ja elastsusmooduli leidmine .....	43
3.3.2 Liimpuidu ristikiudu survetugevuskatsete tulemuste analüüs .....	45
3.4 Väikeste katsekehadega paindekatsete tulemused .....	47

3.5 Väikeste katsekehadega survekatsete tulemused .....	49
KOKKUVÕTE .....	53
Kasutatud kirjandus .....	55
LISAD .....	60
Lisa 1. Nordlum OÜ aiamaad ja paviljonid.....	61
Lisa 2. Nordlum OÜ suvemaja .....	62
Lisa 3. Töös kasutatud liimi andmed .....	63
Lisa 4. Katsekehade kaalumise- ja mõõtmistulemuste andmed .....	65
Lisa 5. Purunemispildid .....	67
Lisa 6. Liimpuittalade koormamisgraafik .....	71
Lisa 7. Väikeste katsekehadega paindekatsete purunemispildid .....	72
Lisa 8. Väikeste katsekehade paindekatsete pingeläbipainde graafikud .....	74
Lisa 9. Halli lepa puidu survekatsete tulemused .....	76
Lisa 10 Liimpuidu survekatsete graafikud .....	78

## SISSEJUHATUS

Hall lepp (*Alnus incana*) on Eesti metsades väga laialdaselt levinud, kuid vähe väärtustatud puuliik. Rahvasuus on hallil lepal tihtipeale halvustav toon, seda just tema kiire heinamaadele leviku ning vähe väärtustatud puidu tõttu. Halli lepa kiire juurdekasvu ja laialdase leviku tõttu kasutatakse seda palju kütteks nii halupuuna kui ka hakkepuiduna. Vähesel määral kasutatakse leppa ka ehituses, nii pakendite kui ka sisevoodrilaudade tootmiseks.

Arvestades halli lepa suurt ressursi, oleks vaja leida sellele puuliigile uusi rakendusi. Käesolevas töös uuritaksegi halli lepa sobivust liimpuidu valmistamiseks, keskendudes tema tugevusomadustele nii paindel kui ka survel ristikiudu. Lisaks uuritakse halli lepa vigadeta puidu tugevusomadusi ning nende seost tiheduse ja niiskusega, sest nendest näitajatest sõltuvad ka liimpuidu omadused.

Liimpuit on järjest enam ehituses rakendatav materjal. Tänu selle väiksele mahukaalule, headele tugevusomadustele ja laialdasele mõõtmete valikule võib arvata, et liimpuidu tähtsus ehituses tõuseb veelgi. Tavaliselt valmistatakse liimpuitu kas männist või kuusest, harvemini ka kasest. Teadaolevalt (vähemasti puuduvad selle kohta kirjalikud allikad) pole proovitud liimpuitu teha hallist lepast. Eelnevatest asjaoludest tingituna on ka valitud käesoleva magistr töö teema. Koostöös Nordlum OÜ-ga, kus toodetakse liimpuidust freespruss-hooneid on välja selgitatud võimalikud sõlmed, kus võiks halli lepa liimpuitu kasutada.

Uurimustöö jaoks infot kogudes saadi mitmelt poolt tagasisidet, et hallist lepast on raske saada pikka ja kvaliteetset materjali. Seevastu liimpuidu tootmiseks saab kasutada ka lühemat materjali sõrmjätkates, ilma et tugevusomadused märkimisväärselt langeksid. Antud faktid loovad eelduse, et hall lepp võiks olla liimpuidu tootmiseks sobiv materjal. Selle teada saamiseks on käesolevas töös loodud vastavad liimpuidust katsekehad ning nendega läbiviidud purustavate katsete tulemusel määratakse kindlaks halli lepa peamised

tugevusomadused, samuti analüüsitakse ja võrreldakse neid omadusi teiste sarnaste liikide liimpuidu omadustega.

Kuna halli lepa puit on võrreldes teiste üldkasutatavate puiduliikidega võrreldes suhteliselt odav, siis oleks ka majanduslikult mõttekas toota liimpuitu hallist lepast.

Käesolev magistritöö on oma olemuselt üles ehitatud kolme põhiosana. Esmalt, et saada ülevaatlilik taustinfo, tutvustatakse halli leppa täpsemalt, liimpuitu kui ehitusmaterjali ning selgitatakse üldisi puidu tugevusomadusi. Eraldi on välja toodud ka võimalikult palju samas valdkonnas tehtud uurimustööde tulemusi, et neid hiljem töö käigus tehtud katsetulemustega võrrelda. Töö keskosas selgitatakse valitud katsete metoodikat ning kirjeldatakse uurimustöö käigus tehtud praktilisi tegevusi. Magistritöö viimane osa koosneb erinevate katsetulemuste analüüsist ning selgitustest.

Antud töös uuritakse peamiselt halli lepa liimpuidu paindetugevust ja survetugevust, lisaks tehakse katseid ka liimimata halli lepa puiduga, et saada võrdlevaid tulemusi liimpuidule. Viimaste katsete puhul on keskendutud paindetugevuse ja survetugevuse omadustele ristikiudu.

Katsete eesmärgiks on välja selgitada halli lepa liimpuidu tugevusomadused ning kõrvutada need standardis määratud liimpuidu omadustega. Katsete tulemusel saab ka järelada, kas antud liimimismetoodika ja liimi valik on sobiv hallile lepale.

# **1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE**

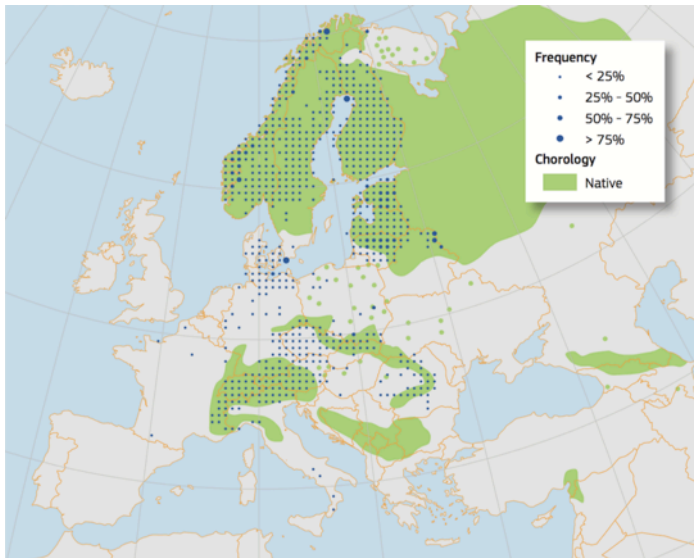
## **1.1 Hallist lepast üldiselt**

Hall lepp (*Alnus incana*) on kiire juurdekasvuga Eesti looduses väga levinud lehtpuu (Becker 2016: 70). Lepa puitu tuntakse eriti tema iseäraliku punaka värvuse tõttu. Siiani on lepa puitu väga vähe hinnatud, kuigi tänu selle kiirele juurdekasvule oleks majanduslikult mõttekas kasutada lepa puitu senisest rohkem. Eesti Maaülikooli töörühm Veiko Uri eestvedamisel on palju uurinud Eestis kasvavate hall-lepikute majandamisvõimalusi ning selle rakendamist biomassi tootmisel.

Hall lepp on lühikese raieringiga puuliik, tema eluiga on 40-50 aastat. Puistu saab mahuküpsiks 15-20 aastaselt ja juurdekasv püsib kõrge ka mitu aastat peale seda (Aosaar 2012). Umbes 70% Eesti hall-lepikutest on 20 aasta vanused ja neid oleks vaja otstarbekalt majandada (Aosaar 2012). Hall-lepikutel on ka tuntud mulda parandav toime. Tänu juurtel kasvavatele mügarbakteritele rikastavad nad mulda lämmastikuga (Aosaar 2012). Seetõttu on ka hall lepp pinnase suhtes vähe nõudlik ja kasvab ka toitainevaestel muldadel. Ka ei vaja puistu taastamine täiendavaid kulutusi, kuna taastub ise juurevõsudest.

### **1.1.1 Hall-lepikute leviala ja tagavara Eesti ja Euroopa metsades**

Hall lepp on levinud suuremas osas Kesk-Euroopas, ulatudes läänest Prantsusmaani ja idast Venemaale Kaukasuseni ning laialt levinud ka Skandinaavias (Joonis 1) (Durrant 2016: 1).



**Joonis 1.** Halli lepa leviala (*chorology*) ja esinemissagedus (*frequency*). *Native* – looduslikult levinud (Meusel, 1998 ref Durrant, 2016)

Kuna hall lepp on väga külmakindel, siis leidub seda isegi kuni Skandinaavia põhjaosadeni välja ning Kaukasuses kuni 1800 m kõrguseni. Erinevaid lepa alaliike kasvab ka Ameerika Ühendriikide põhjaosas, Kanadas ja ka Kagu-Aasias. (Durrant 2016: 1)

Eestis on hall lepp puuliikide seas levikult neljandal kohal ja leviala aina kasvab, kuna mahajäetud põllumaad täituvad kiiresti peale kasvavate lepikutega (Uri 2004). Rohkem on hall-lepikud levinud Lõuna- ja Kesk-Eestis (sealsamas). Põhja-Eestis on hall-lepikuid vähe ja saartel puuduvad peaaegu üldse (sealsamas). Üldiselt on ülekaalus raieküpsed ja üleküpsed lepikud, mis viitab hall-lepikute vähesele majandamisele (sealsamas). Eesti metsades on halli lepa tagavara ligikaudu 32 842 000 m<sup>3</sup> ja keskmine hektaritagavara on 160m<sup>3</sup>/ha (Aastaraamat "Mets 2014"). Aastate jooksul on kogutagavara oluliselt tõusnud, nt 1988. aastal oli halli lepa kogutagavara 8 180 000m<sup>3</sup> (sealsamas).

### 1.1.2 Kasutusvaldkonnad

- Küte.

Peamiselt kasutatakse halli leppa küttepuidu valmistamiseks ja hakkepuidu tootmiseks. Järjest enam ehitatakse suuri hakkepuidul töötavaid katlamajasid nagu näiteks Vão, Tartu, Pärnu, kus kasutatakse suuri koguseid hakkepuitu (Uri 2004). Sisemaine kogu küttepuidu

tarbimine (küttepuid, puiduhake ja jäätmed) oli 2012. aastal 4 497 000 m<sup>3</sup> (Aastaraamat "Mets 2014").

- Sõe tootmine.

Halli lepa puit on sobilik ja soodne puusõe tootmiseks. 2001. aastal toodeti umbes 500 tonni puusütt. Ühe tonni valmistamiseks kulub ligikaudu kuus tihumeetrit puitu ja enamik sellest oli hall lepp. (Uri, 2004)

- Saematerjal.

Võrreldes kuuse ja männiga, toodetakse lepast saematerjali vähe. Peamiselt kasutatakse lepa laudu transpordikastide, kaubaaluste ja muude pakendite tootmiseks. Lisaks on hall lepp ka väga hinnatud sisevoodrilaudadena ja sauna leiliruumi materjalina, seda just lepale iseloomuliku punaka tooni tõttu.

## **1.2 Liimpuit**

### **1.2.1 Liimpuidust üldiselt**

Liimpuidu tootmistehnoloogia töötati välja juba 20. sajandi alguses Saksamaal ning esimene patent liimpuidule on Otto Herzeri nimel aastast 1906 (Crocetti jt 2011: 2.31). Üldiselt nimetatakse liimpuiduks materjali, mis koosneb vähemalt neljast pikikiudu kokku liimitud kihist ehk lamelist. Lamellid on tavaliselt 45 mm paksud ja kuni 215 mm laiad (sealsamas: 2.31). Vastavalt Eestis kehtivale standardile EVS-EN 14080:2013, jaotatakse liimpuittooted järgnevalt:

- 1) Plankliimpuit - kahest kuni viiest kokku liimitud lamelist mis on paksusega 45-85 mm.
- 2) Lamell-liimpuit - vähemalt kahest samasuunaliselt kokku liimitud lamelist, mille paksus on 6-45 mm.
- 3) Ristkihtliimpuit - koosneb lamellide kihtidest, mis on üksteise kiudude suunas ristipidiselt kokku liimitud.
- 4) Plokkliimpuit – materjal, mis on külgsuunaliselt kokku liimitud mitmest liimpuitdetailist.

Liimpuidu eesmärgiks on ära ühtlustada erinevate lamellikihtide puidurikked ja seega saadakse ühtlaselt tugev materjal. Lisaks on liimpuitu võimalik, lamelle sõrmjätkates, toota



väga pikkadena, piirangu seab ainult transport. Lamelle kokku liimides saab materjal oluliselt paremad tugevusomadused kui tavalisel massiivpuidul. Lubatud pinged võivad liimpuidus olla 20-40% kõrgemad kui massiivpuidus. (Saarman 2006) Lisaks on liimpuidul ka head tulepüsivusomadused D-s2,d0 (EVS-EN 14080).

### 1.2.2 Tootmine

Eestis hakati liimpuitu tootma 70-ndate aastate keskel Põlvas. Praegugi on Põlvas Eesti suurimad liimpuidutootjad Peetri Puit (Arcwood) ja AS Liimpuit (Saarman 2006).

Liimpuidu tootmiseks on vaja kuiv materjal sorteerida, vajadusel sõrmjätkata ning anda paksusmasinas lamellidele täpsed mõõtmed. Seejärel kantakse lamellidele liim ja paigutatakse lamellid üksteise peale ning surutakse hüdraulilise või mehaanilise pressiga kokku. Peale liimi kõvenemist, milleks kulub, olenevalt liimist, 60-90 minutit, võetakse talad pressi alt välja ja jäetakse seisma, kuni liim on oma lõpliku tugevuse saavutanud – selleks kulub minimaalselt 24 tundi ja alles seejärel võib materjali edasi töödelda. Järgmise etapina toode hõõveldatakse ja antakse projektis ettenähtud kuju. (Wood handbook 2010)

Kaarjate detailide tootmiseks kasutatakse õhemaid lamelle, mida saab suruda etteantud vormi enne liimimist (Crocetti jt 2011). Liimpuitu saab toota nii täisautomaatselt kui ka käsitsi, kasutades hüdraulilisi ja mehaanilisi käsipresse. Siim Sulamägi on 2014. aastal Eesti Maaülikooli tootmistehnika erialal teinud bakalaureusetöö liimpuidu käsipressi valmistamise kohta. Sellist pressi oleks mõttekas omada metsaomanikul, kes saaks lihtsate vahenditega toota oma tarbeks liimpuitu.

Selleks, et vältida pilusid ja liimivuuk oleks piisavalt ühtlane, peaks lamellide kokku pressimisel olema surve  $294-490 \text{ kN/m}^2$  (Just E. 2012). Lisaks tuleb lamellide paigaldamisel jälgida aastarõngaste suunda, et vältida suuri sisepingeid (Saarman 2006). Vastavalt EVS - EN 14080 nõuetele, peavad olema liimpuidu kihid paigutatud nii, et äärmistes kihtides oleks säsi välimises ääres (Joonis 2a), välja arvatud olukorras, kui liimpuitu kasutatakse kas esimeses või teises kasutusklassis. Nendel juhtudel võivad kõik kihid liimpuidus olla aastarõngaste järgi samasuunalised (Joonis 2b) (EVS-EN 14080:2013).



**Joonis 2.** Aastarõngaste suund liimpuidus a – ülemine ja alumine lamell südamikupoolega väljapool. b – kõik lamellid ühtepidi (EVS-EN 14080:2013)

Liimpuitu valmistatakse nii homogeenst ehk sellist, mille kõik lamellid on ühesugusest tugevusklassist ja ka kombineeritud, milles on 1/6 ristlõike osas ülevalt ja 1/6 ristlõike osas alt kasutatud tugevamaid lamelle ja siseosas kasutatakse nõrgema tugevusklassiga puitu. (Saarman 2006)

Liimidest kasutatakse peamiselt fenoolformaldehüüd-, resortsiinformaldehüüd-, karbamiidformaldehüüd-, melamiin- jt. liime (Põlvas kasutatakse näiteks spetsiaalseid niiskuskindlaid Dynea melamiinliime). Liim peab olema piisavalt kleepuv, elastne ja tugev ning mahukahanemine peab olema võimalikult väike. Liime on nii kahekomponentseid kui ka ühekomponentseid. Kahekomponentsete eelis on see, et eraldi olevatel komponentidel on pikk säilivusaeg, kuid miinuseks on enne kasutamist komponentide kokku segamisele kuluv aeg. Ühekomponentseid liime saab kohe lamellidele kanda aga nende säilivusaeg pole nii pikk. (Just E. 2012)

Välitingimustes ja ka sõrmjätkudes kasutatakse veekindlaid liime, mis muudavad ka jätkukohad natuke tumedamaks. Ruumides sees asuvas liimpuidus kasutatakse aga värvuseta kaseiinliimi (Saarman 2006).

### 1.2.3 Liimpuidu tugevusklassid

Puidu tugevusklassid määratakse kas visuaalselt või masinsorteerides. Eesti standardi järgi on ehituspuidu tugevusklassid C16; C18; C24 jne., milles “C” tähistab okaspuitu. Lehtpuidu tugevusklassid on D16; D18, D24 jne., milles “D” tähistab lehtpuitu, number mõlemas tugevusklassis tähistab normatiivset paindetugevust ( $\text{N/mm}^2$ ). Liimpuit jaotatakse tugevusklassidesse vastavalt seal kasutatud lamellide tugevusklassile (Tabel 1).

Selles tabelis antakse lamellide tugevusklass “T” tähega. Sellist tähistust kasutatakse mõningates Euroopa Liidu riikides. Kirjeldatud tähistuses näitab number tähe “T” taga materjali normatiivset tõmbetugevust (Just E. Jt 2015: 43).

**Tabel 1.** Liimpuidu tugevusklass vastavalt lamellide tugevusklassile T- tugevusklass normtõmbetugevuse järgi(EVS-EN 14080:2013)

Liimpuidu tugevusklass	Lamellide tugevusklass
GL 20h	T10 (C16)
GL 20h	T11 (C18)
GL 22h	T13 (C22)
GL 24h	T14 (C24)
GL 26h	T16 (C27)
GL 28h	T18 (C30)
GL 30h	T21 (C35)
GL 30h	T22
GL 32h	T24 (C40)
GL 32h	T26

Liimpuidu tähiseks tugevusklassidel on GL (GL24h; GL28h; GL32h ja GL36h) - väike täht “h” tähistab homogeenset liimpuitu, kui on täht “c” siis on tegemist kombineeritud liimpuiduga. (Just E. 2001) Põlvas asuv AS Liimpuit toodab DIN 1052 standardile vastavat liimpuitu, mis kuulub GL28h tugevusklassi. Pikaajalised kogemused Liimpuit AS-s näitavad, et tegelikult vastavad nende GL28h materjalid tugevusomadustele GL32h. (Must, Nemvalts 2002)

Skandinaaviamaades toodetakse liimpuitu tugevusklassidega L20; L30; L40 - nendes tähistes näitab number vastava tüübi karakteristikliku tugevusväärtust ja ühikuks on MPa või N/mm<sup>2</sup> (Saarman 2006).

#### 1.2.4 Liimpuidu kasutusvaldkonnad

Liimpuidu üks eeliseid on tema hea välimus ja seetõttu kasutatakse tihtipeale liimpuitu sellistes hoonete kandekonstruktsioonides, mis jäävad kasutuse ajal näha. Sellised on paljud spordiväljakute ja hallide katusekonstruktsioonid, kus on ka lisaks heale

väljanägemisele vaja toetada suuri sildeavasid. Eriti suurte sildeavade korral - 100 m ja rohkem, kasutatakse liimpuitu kombineerituna terasega. Kuna liimpuitu on võimalik toota väga pikkade ja erikujuliste detailidena, siis kasutatakse seda ka palju sildade ehituses nagu näiteks liimpuitkaartega sild Oslos (vt. Joonis 3).



**Joonis 3.** Leonardo da Vinci sild Oslos (Garbett 2008)

Ka mööblitööstuses on liimpuit laialt kasutuses nii liimpuitkilpide näol kui ka painutatud liimpuit-detailidena.

### **1.2.5 Liimpuidu kasutamine Nordlum OÜ-s**

Nordlum OÜ on Tartumaal, Alatskivi vallas asuv puidutööstusettevõtte, mille põhitegevusaladeks on freesprussidest aiamajade ja varikatuste tootmine (vt. Lisa 1), lisaks toodetakse ka väiksemaid suvemaju (vt. Lisa 2). Suurem osa antud ettevõtte toodangust läheb Belgiasse ja Hollandisse, vähemal määral eksporditakse ka Senegali ja Kariibi mere saartele. Praegu kasutatakse ettevõtte toodetes liimpuitu kandvate postide ja suuremate talade valmistamiseks. Kogu vajaminev liimpuit toodetakse kohapeal hüdraulilise pressiga männi puidust. Liimimiseks kasutatakse ühekomponentset polüuretaanliimi (vt. Lisa 3). Antud ettevõtte on väga huvitatud kasutamast oma toodangus halli lepa liimpuitu, kuna toormaterjal on soodsam ja lepale iseäralik toon teeks tooted huvitavamaks.

### 1.3 Puidu füüsikalised omadused

Materjali tugevus on võime taluda erinevaid koormusi ilma, et materjal puruneks. Alates väikestest koormustest tekivad materjalides pinged ja ka deformatsioonid. Koormus ja pinge materjalis suurenevad proportsionaalselt ja kui materjal puruneb, siis on ületatud maksimaalne pinge, mida materjal on võimeline vastu võtma. Pinge määratakse nii tõmbel kui ka survel, koormuse ja ristlõikepinna suhtena (vt. valem1). (Saarman, Veibri 2006: 133)

$$\sigma = \frac{P}{A}, \quad (1)$$

kus  $\sigma$  – pinge N/mm<sup>2</sup>;  
P – koormus N;  
A – ristlõikepindala mm<sup>2</sup>.

#### 1.3.1 Elastsus ja jäikus

Elastsus on materjali võime deformeeruda ning peale välisjõudude eemaldamist taastub esialgne kuju. Elastsust iseloomustab elastsusmoodul (E), mis määratakse pinge ja sellele vastava elastse deformatsiooni suhtega (valem 2). Seos kehtib eeldusel, et säilib proportsionaalsus. Mida suurem on elastsusmoodul, seda väiksemad on deformatsioonid. (Saarman, Veibri 2006: 136)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (2)$$

kus E – elastsusmoodul N/mm<sup>2</sup>;  
 $\sigma$  – pinge N/mm<sup>2</sup>;  
 $\varepsilon$  – deformatsioonimoodul.

Puidu elastsus sõltub puuliigist, tihedusest, niiskuse sisaldusest ja koormuse suunast kiudude suhtes. Pikikiudu on puidu elastsusmoodul 7000...12000 N/mm<sup>2</sup> ja ristikiudu 200...500 N/mm<sup>2</sup>.

*“Jäikus on keha võime koormuse all avaldada vastupanu deformeerumisele elastsuspiiri ulatuses”* (Saarman 2006: 136).

### 1.3.2 Paindetugevus

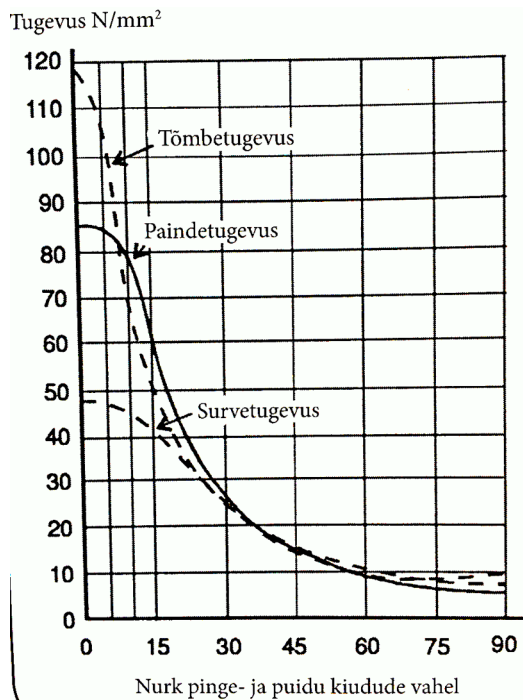
Paindetugevus on tõmbe-, surve- ja nihketugevuse kombinatsioon, mille väärtus puidul jääb tõmbe ja survetugevusväärtuste vahele (vt. Joonis 4). Puhaspaine korral on koormuse pool olevad kiud surutud ja teisel pool olevad kiud tõmmatud ning keskel on neutraalne tsoon. Kõrgete koormuste korral liigub neutraalne tsoon koormusest eemale ning tõmbepinge alumistes kihtides on suurem kui survepinge ülemistes kihtides. (Saarman, Veibri 2006: 141) Seetõttu saab purunemisel tihtipeale määravaks puidu tõmbetugevus. Paindetugevust arvutatakse maksimaalse paindemomendi ja vastupanumomendi jagatisega (vt. valem 3).

$$\sigma_{m,d} = \frac{M}{W} , \quad (3)$$

kus  $\sigma_{m,d}$  - arvutuslik paindepinge N/mm<sup>2</sup>;

M – paindemoment N\*m;

W – vastupanumoment mm<sup>3</sup>.



**Joonis 4.** Riketeta männipuidu tõmbe-, surve- ja paindetugevuse sõltuvus koormuse suuna ja puidukiudude suuna vahelisest nurgast (Brennert 1980 ref Saarman 2006: 138).

### 1.3.3 Survetugevus ja tõmbetugevus

Defektideta puidu survetugevus on pikikiudu umbes pool tõmbetugevusest, kuid ei sõltu niipalju puidu defektidest (Saarman, Veibri 2006: 140). Survel pikikiudu on vaja rakendada suuri jõudusid, et puidu kiud hakkaksid nõtkuma ja tungiks teineteise vahele. Sellist olekut, kui puidu kiud juba välja nõtkuvad, nimetatakse plastseks. (Crocetti jt. 2011: 2.15)

Survel ristikiudu surutakse juba väikeste jõudude korral puidukiud kokku ning puit deformeerub (Crocetti jt. 2011: 2.16). Ristikiudu survet nimetatakse ka muljumiseks ja kuna seal on deformatsioonid väga suured, siis peetakse muljumistugevust tinglikuks suuruseks, mida piiratakse deformatsiooniga (Just E. 2012). Arvutustugevuseks kasutatakse muljumisel proportsionaalsuse piiri, mis sõltub muljuva keha ja muljutava keha pindade suurusest (Just E. 2012). Puidu koormamisel ristikiudu on ka oluline elemendi vaba otsa pikkus kiudude suunas, arvutustes arvestab seda tegur  $k_{c,90}$ .

Mida tihedam on puit, seda suurem on ka survetugevus. Kuusel, näiteks, on pikikiudu survetugevus ligikaudu  $45 \text{ N/mm}^2$ . Ristikiudu on aga survetugevus tavaliselt 5-6 korda väiksem kui pikikiudu. Pikikiudu otsast koormamise korral on pikemate detailide puhul oht pikipaindele ehk nõtkumisele, alates hetkest, kui keha pikkus on 4-5 korda suurem ristlõike mõõtmetest. (Saarman, Veibri 2006: 140)

### 1.3.4 Tugevusklassi määramine

Puidu tugevusklassi määratakse nii visuaalselt kui ka masinsorteerides. Visuaalsel sorteerimisel antakse puidule tugevusklass, mis vastab kindlatele tugevus- ja jäikusomadustele (Šumigin 2008). Tugevusklass määratakse igale detailile visuaalselt puidu pinnal näha olevate okste, defektide ja ebakorrapärasuste järgi. Visuaalse sorteerimise jaoks on Euroopas erinevaid juhendeid: Skandinaavias INSTA 142, Saksamaal ja Austrias DIN4074-1, Prantsusmaal NF B52-001 (Riberholt, 2008). Eestis on enamlevinud INSTA 142, kus arvestatakse oksa suuruse suhet vastavasse külge ning oksasummat (Šumigin 2008).

Masinsorteerimiseks on mitmeid erinevaid tehnoloogiaid, tuntumad neist on:

1. Painutamine – lauad liiguvad lapiti läbi rullikute, kus arvutatakse läbipainde järgi elastsusmoodul ning selle järgi sorteeritakse tugevusklassidesse (Crocetti jt. 2011: 2.27). Selline masinsorteerimise viis on kõige vanem ning sobib suurtele mahtudele (Crocetti jt. 2011: 2.27).
2. Vibratsioon – materjalis tekitatakse vibratsioon ja vastavalt kindlale resoneerimissagedusele arvutatakse välja elastsusmoodul (Crocetti jt. 2011: 2.28). Mitmed uurimused näitavad, et kui materjal ei esine väga palju oksa on selline sorteerimissüsteem parem kui painutamine (Crocetti jt. 2011: 2.28).
3. Akustiline tugevussorteerimine – põhineb heli levimisel puidus pikikiudu. Mõõdetakse aega, mis kulub helil materjali läbimiseks. Heli kiiruse järgi on võimalik arvutada materjali elastsusmoodul.
4. Röntgeniga sorteerimine – materjali valgustatakse röntgenkiirtega ning saadakse täpne ülevaade okstest ja puidu eripäradest materjalis, mille järgi omistatakse tugevusklass (Crocetti jt. 2011: 2.28).



## 1.4 Samas valdkonnas tehtud uurimustööd

Kuna hallist lepast pole teadaolevalt varem liimpuitu tehtud ning ka tugevusomadusi on vähe uuritud, kasutan antud töös võrdlusteks nii kuuse ja männi liimpuidu omadusi, kui ka lepale võimalikult sarnaste puiduliikide uurimustulemusi.

Halli lepa, musta lepa ja hübriidlepa tugevusomaduste võrdluse ja analüüsi sõltuvalt tüve kõrgusest on teinud oma töös Gunars Pavlovics, jt 2010. aastal. Sellest töös on mõõdetud erinevate lepa liikide tugevusomadusi neljas tüve kõrguse osas. Saadud tulemustest on näha, et survetugevus kasvab tüve pidi ülespoole liikudes hübriidlepal ja mustal lepal. Hallil lepal on kõige suurema survetugevusega puit ¼ osas tüve kõrgusest, (vt. Tabel 2). Seda seostatakse väitega, et see osa tüvest kannatab kõige suuremate tuulte poolt põhjustatud koormuste all. Ka tihedus on tüve ülemistes osades suurem kui alumises.

**Tabel 2.** Halli lepa, hübriidlepa ja musta lepa tihedus ja tugevusomadused (Pavlovics jt. 2010)

Liigid	Tüve osa	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]		Survetugevus [N/mm <sup>2</sup> ]		Elastsusmoodul [Gpa]	
		välimine osa	sisemine osa	välimine osa	sisemine osa	välimine osa	sisemine osa
Hall lepp	R	464	437	41,10±0,45	36,10±0,72	2,15±0,21	1,68±0,19
	1/4	477	450	46,34±1,69	40,12±2,18	2,14±0,13	2,03±0,21
	1/2	465	489	42,71±1,69	42,65±1,91	1,90±0,14	2,16±0,14
	3/4	505	509	54,44±1,41	43,09±2,39	2,29±0,17	2,16±0,21
Hübriid lepp	R	497	462	42,50±4,76	41,20±2,77	2,21±0,21	2,11±0,18
	1/4	501	484	45,90±2,64	42,80±2,30	2,52±0,13	2,25±0,15
	1/2	521	497	46,10±2,67	43,70±2,10	2,54±0,16	2,26±0,23
	3/4	550	536	48,10±1,70	45,20±1,85	2,65±0,24	2,46±0,27
Must lepp	R	504	507	41,02±0,45	40,04±0,72	2,10±0,21	2,17±0,11
	1/4	532	508	46,00±1,86	43,58±2,16	2,22±0,20	1,86±0,24
	1/2	542	528	48,98±1,87	47,36±0,35	2,17±0,27	2,02±0,08
	3/4	554	570	48,28±2,39	47,39±2,66	2,41±0,09	2,39±0,13

Keskmine paindetugevus ja paindeelastsusmoodul on eelnevalt nimetatud töös kõige suurem hübriidlepal, teisel kohal on must lepp ja kõige väiksem paindetugevus on hallil lepal, (vt. Tabel 3).

**Tabel 3.** Halli lepa, hübriidlepa ja musta lepa omadused (Pavlovics, jt. 2010)

Liigid	Tüve osa	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]		Paindetugevus [N/mm <sup>2</sup> ]	Elastsusmoodul [Gpa]
		välimine osa	sisemine osa	Välimine osa	sisemine osa
Hall lepp	R	460	454	55,46±4,46	6,622±0,731
	1/4	481	455	64,39±2,80	7,848±0,519
	1/2	491	497	-	-
	3/4	529	536	-	-
Hübriidlepp	R	491	462	68,60±5,63	8,318±0,903
	1/4	512	484	65,40±6,29	7,447±0,437
	1/2	521	497	66,10±3,61	7,516±0,446
	3/4	550	536	66,10±2,76	7,698±0,412
Must lepp	R	526	515	51,29±5,77	6,304±0,566
	1/4	552	516	71,60±4,97	8,364±1,020
	1/2	560	568	-	-
	3/4	576	610	-	-

Taavi Korsar on oma magistritöös 2014. aastal uurinud musta lepa ja haavapuidu tugevusparameetreid nii purustavalt kui ka mittepurustavalt. Katsekehadeks oli valmistatud 48 haava ja 48 musta lepa prussi mõõtmetega 50 x 50 x 950 mm<sup>3</sup>. Selles töös on saadud purustaval meetodil musta lepa keskmine elastsusmoodul 9516 N/mm<sup>2</sup> ja paindetugevus maksimaalselt 69,47 N/mm<sup>2</sup> ning minimaalselt 48,89 N/mm<sup>2</sup>. Mittepurustavalt oli maksimaalsete paindepingete keskmine 51,98 N/mm<sup>2</sup> ning elastsusmoodul 9516 N/mm<sup>2</sup>. Tööst järeldus, et haava puidust katsekehad on ühtlasema tugevusega kui musta lepa puidust katsekehad.

Võrdluseks võib tuua ka kuuse puidu tugevusnäitajad, mida on erinevatel aegadel Eesti Maaülikoolis uuritud.

Mirko Hani uuris oma magistritöös kuuse ja männi tugevusomadusi nii purustaval kui ka mittepurustaval meetodil. Katsekehade suuruseks oli tema töös valitud 50 x 50 x 970 mm<sup>3</sup> ning koormus rakendati tangentsiaalsuunas. Tulemuseks saadi, et kuuse keskmine paindetugevus on 37,33 N/mm<sup>2</sup> ja männil 52,36 N/mm<sup>2</sup>.

Marko Teder uuris oma doktoritöös 2016. aastal erinevate puuliikide aastaid kasutuses olnud puidu ja ka värskelt saetud puidu tugevusomadusi. Tema töös on saadud musta lepa (*Alnus glutinosa*) paindetugevuseks 51,98 N/mm<sup>2</sup> ning elastsusmooduliks 9516 N/mm<sup>2</sup>. Katsekehade keskmine tihedus oli 517,8 kg/m<sup>3</sup> ja niiskus 13,6%. Kuuse puidul saadi

paindetugevus  $37,33 \text{ N/mm}^2$  ja elastsusmoodul  $7821 \text{ N/mm}^2$ . Kuuse puidust katsekehade niiskus oli 14,17% ja tihedus  $426,9 \text{ kg/m}^3$ .

Kuuse ja männi väikeste proovikehade ( $20 \times 20 \times 300 \text{ mm}^3$ ) paindetugevus on ligikaudu  $100 \text{ N/mm}^2$  kuid suurte proovikehade puhul on sama näitaja umbkaudu poole väiksem, kuna puidus esineb oksi ja ebareeglipärasusi (Saarman, Veibri 2006: 142).

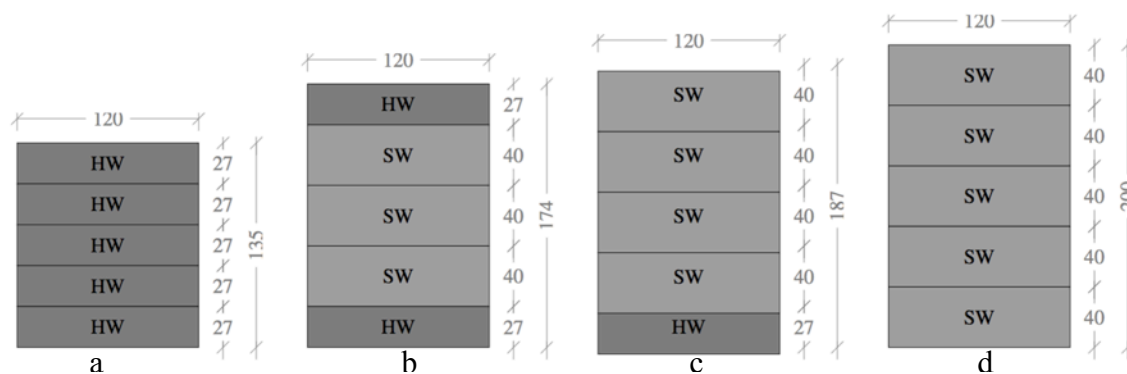
Saksamaal 2013. aastal tehtud uurimustöös *Bending Tests on Glued Laminated Timber Beams with Well-Known Material Properties* (Fink jt. 2013) on uuritud kuusest liimpuittalade paindetugevust. Töös on kasutatud 24 liimpuittala mõõtmetega  $115 \times 320 \times 6000 \text{ mm}^3$ . Lamellide tugevuse järgi sorteerides kuulusid pooled katsekehade tugevusklassi GL24h ja pooled GL36h. Sarnaselt käesoleva tööga, kasutati nelja punkti paindekatset ning lähtuti EN 408 nõuetest. Eraldi olid veel katsekehad jaotatud kaheks – homogeensed ja kombineeritud. Siinkohal on välja toodud homogeensete katsekehade tulemused (Tabel 4). Katsekehad on tähistatud vastavalt lamellide tugevusklassile L25-H ja L40-H. L25 tugevusklassiga lamellide tõmbetugevus on  $14,5 \text{ N/mm}^2$ , tihedus  $350 \text{ kg/m}^3$  ja elastsusmoodul  $11000 \text{ N/mm}^2$ . L40 klassi kuuluvate lamellide tõmbetugevus on  $26 \text{ N/mm}^2$ , tihedus  $420 \text{ kg/m}^3$  ja elastsusmoodul  $14000 \text{ N/mm}^2$ .

**Tabel 4.** Kuuse liimpuidu omadused (Fink jt 2013)

Katsekeha nr.	Paindetugevus $f_m$ [MPa]	Läbipaine $w$ [mm]	Elastsusmoodul $E_g$ [MPa]	Tihedus $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
L25-H-1	28,5	56,1	1 0825	471
L25-H-2	25,1	49,9	10684	480
L25-H-3	32,5	59,8	11768	480
L25-H-4	34,2	68,5	11082	480
<b>keskmine</b>	<b>30,1</b>	<b>58,6</b>	<b>11178</b>	<b>477,8</b>
L40-H-1	47,3	70,6	14463	562
L40-H-2	42	57,7	15822	562
L40-H-3	56,8	87,1	14585	-
L40-H-4	46	64,9	15284	553
<b>keskmine</b>	<b>48,0</b>	<b>70,1</b>	<b>15038</b>	<b>559</b>

Antud töös olid liimpuidust katsekehad valmistatud sõrmjätkuga lamellidest. Purunemine toimus peamiselt kahes alumises lamellikihis. Selliste katsekehade purunemine, mille lamellide tugevusklass oli L25, toimus alumises lamellis kas oksakohalt või, harvemal juhul, puhtas puidus. Altpoolt teises reas toimus purunemine mõningatel juhtudel ka sõrmjätkühenduses. L40 tugevusklassiga lamellides toimus purunemine mõlemas viimases reas varieeruvalt puidus, oksakohas või sõrmjätkukohas.

Erinevatest puiduliikidest kombineeritud liimpuitu on uuritud Rootsi ülikoolis *Linnaeus University*. Aishwarya Muraleedharan ja Stefan Markus Reiterer uurisid oma töös *Combined Glued Laminated Timber Using Hardwood and Softwood Lamellas* tamme ja kuuse lamellidest kombineeritud liimpuitu. Selles töös uuriti peamiselt paindetugevust ja elastsusmoodulit. Paindekatsel oli tugede vaheline kaugus 2700 mm. Materjali mõõtmed olid vastavalt liimpuidu tüübile 2900 x 120 x 135 mm<sup>3</sup> kuni 2900 x 120 x 200 mm<sup>3</sup>. Katsekehadeks olid nelja tüüpi liimpuittalad: 1. kõik lamellid tamme puidust ((Joonis 5 a), 2. ülemine ja alumine lamell tamme puidust, keskmised kuusest ((Joonis 5 b), 3. ainult alumine lamell tamme puidust ((Joonis 5 c), 4. kõik lamellid kuuse puidust ((Joonis 5 d).



(Joonis 5. Lamellide paigutus liimpuidus HW-tamm SW-kuusk (Muraleedharan, Reiterer 2016 :29)

Kuuse lamellide tugevusklass oli C24 ja tamme lamellide tugevusklass D40. Seega oli ainult kuuse puidust liimpuittala tugevusklassiks GL24h vastavalt standardile EVS-EN 14080:2013. Igat tüüpi talasid oli 3 tükki. Katsete tulemused on toodud Tabel 5.

**Tabel 5.** Liimpuidu katsetulemused a - tamm b - tamm, kuusk, tamm c- kuusk, tamm, d - kuusk (Muraleedharan, Reiterer 2016)

Tala tüüp	b	h	Niiskus	Läbipaine	Paindetugevus
	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]
a	117,1	135,1		55,2	54,57
a	118,3	135,5		66,8	67,87
a	118,2	135,4		52,9	58,56
a keskmine					<b>60,34</b>
b	126,6	175,0		62,4	62,12
b	118,2	175,5	11,0	45,0	58,59
b	118,2	175,2		45,2	51,50
b keskmine					<b>57,40</b>
c	118,2	186,2	12,3	35,2	42,03
c	118,2	186,5	11,7	50,1	56,61
c	118,2	186,3		39,6	49,76
c keskmine					<b>49,47</b>
d	118,2	200,0	11,5	32,9	41,12
d	118,3	200,0	11,5	18,6	25,79
d	118,8	200,3		30,2	40,67
d keskmine					<b>35,86</b>

## **2 KATSETE METOODIKA**

### **2.1 Hallist lepast liimpuittalade paindekatsed**

Paindekatsete eesmärgiks oli kindlaks teha halli lepa liimpuidu paindetugevus ja elastsusmoodul. Katsed teostati vastavalt EVS-EN 408:2010+A1: 2012 nõuetele Eesti Maaülikooli konstruktsioonide laboris, kus kasutati purustavas paindekatses 11 katsekeha mõõtudega 95 x 150 x 3000 mm<sup>3</sup>.

#### **2.1.1 Katseseadmed**

Katseseadmetena kasutati hüdraulilist silinderpressi Lukas, mille maksimaalne survejõud on 250 kN. Läbipainded saadi nihkeanduritest, millest tulevad andmed salvestas andmesalvestaja Almemo 5690-2. Niiskus katsekehades mõõdeti seadmega Hydromette HT85T ning täpne kaal kuue tunniaste vahekaalumistega saadi digitaalse kaaluga.

#### **2.1.2 Katsekehad**

Katsekehadeks olid halli lepa liimpuittalad, mis tulenevalt standardis EVS-EN 408:2010+A1 2012 ettenähtud kõrguse ja pikkuse suhtest, olid valitud mõõtudega 95 x 150 x 3000 mm<sup>3</sup>. Talad olid kokku liimitud kuuest lamelist mõõtudega 27 x 100 x 3000 mm<sup>3</sup>. Lamellide paksus sai valitud tavapärasest väiksem, kuna eeldades, et lepa palgid on peened ja mõningate kõverustega, siis on paksema materjali kättesaamine keerulisem ja suurte kadudega. Seega on otstarbekam halli lepa liimpuidu valmistamiseks kasutada lamelle paksusega kuni 30 mm.

Vastavalt standardile EVS-EN 408:2010+A1 2012 määrati katsekehade niiskus, tihedus ja täpsed mõõdud. Mõõdud võeti tala kõigist külgedest: tala kogupikkuse kolmest punktist ja otstele mitte lähemalt kui 150 mm. Mõõtmise tehti täpsusega 0,01 mm. Seejärel konditsioneeriti keskkonnas 20±2 °C ja 65% niiskuse juures. Konditsioneerimise

eesmärgiks oli saavutada püsiv kaal kuue tunnise intervalliga kaalumiste järel. Kaalumise teostati elektroonilise kaaluga, täpsusega 0,01 kg. Kaalumis- ja mõõtmistulemused on toodud Lisas 4.

Katsekehad valmistati OÜ Nordlum tootmishoones, kus kasutati kokkupressimiseks hüdraulilist liimpuidupressi, liimi pealekandmiseks automaatset liimidosaatort ning lamellide hõõveldamiseks nelikant hõõvelmasinat GUBISH SL-200.

Lauad liimpuidu valmistamiseks varuti Valgamaalt, Nõunist OÜ Eesti-West saekaatriist, kus need olid kuivanud kaks aastat. Kokku viidi OÜ Nordlumi tehasesse 170 lauda. Laudade niiskussisaldus enne hõõveldamist oli 10-14%, mõõdetud seadmega GANN Hydromette M2050. Laudade esialgsed mõõdud olid 42 x 102 x 3050 mm<sup>3</sup>. Nelikant hõõvliga anti laudadele vajalikud mõõdud ning seejärel sorteeriti lauad visuaalselt tugevusklassidesse. 170st lauast 124 kuulusid tugevusklassi D18. OÜ Nordlumil on ka sertifikaat puidu tugevussorteerimiseks.

Liimpuidu valmistamiseks kasutati materjali, mille tugevusklass vastas D18 nõuetele ning vastavalt EVS-EN:14080:2013 annab see liimpuidu tugevusklassiks GL20h (Tabel 1). Liimpuidu tugevusomadused on toodud Tabel 6.

Sorteeritud materjal valmistati ette liimi pealekandmiseks, paigutades lamellid aastarõngaste järgi õigesse järjekorda nii, et südamikuosa jääks äärmistes lamellides väljapoole suunatuna nagu näha Joonisel 2. Seejärel kanti lamellidele liim kahes reas, selliselt nagu näidatud Joonis 6 ja paigutati pressile. Korraga mahtus pressi aluse ja surve silindrite vahele kuue liimpuittala jagu materjali. Külgsuunas suruti lamellid ühele joonele pneumaatiliste pressidega.

**Tabel 6.** Homogeense liimpuidu tugevus- ja jäikusomadused  $\text{N/mm}^2$  ja tihedused  $\text{kg/m}^3$  (EVS-EN 14080:2013,)

Omadus	Tähis	GL20h	GL22h	GL24h	GL26h	GL28h	GL30h	GL32h
Paindetugevus	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Tõmbetugevus	$f_{t,0,g,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,3	24	25,6
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Survetugevus	$f_{c,0,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Elastusmoodul	$E_{0,g,mean}$	8400	10500	11500	12100	12600	13600	14200
	$E_{0,g,05}$	7000	8800	9600	10100	10500	11300	11800
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Tihedus	$\rho_{g,k}$	340	370	385	405	425	430	440
	$\rho_{g,mean}$	370	410	420	445	460	480	490



**Joonis 6.** Liimi pealekandmine lamellidele

Pressimiseks kasutati kuut hüdrocilindrit (Joonis 7), millest igaühes oli surve 60 bar, mis arvutuslikult annab surve talale  $1,7 \text{ N/mm}^2$ . Surve on küll suurem kui standardis EVS-EN 4080: 2013 ette nähtud  $0,8 \text{ N/mm}^2$ , kuid ettevõtte pikaajalisele kogemusele tuginedes kasutati surveks  $1,7 \text{ N/mm}^2$ . Materjali hoiti pressi all 45 minutit ning seejärel pandi 24 tunniks seisma, et liim saavutaks oma lõpliku tugevuse.



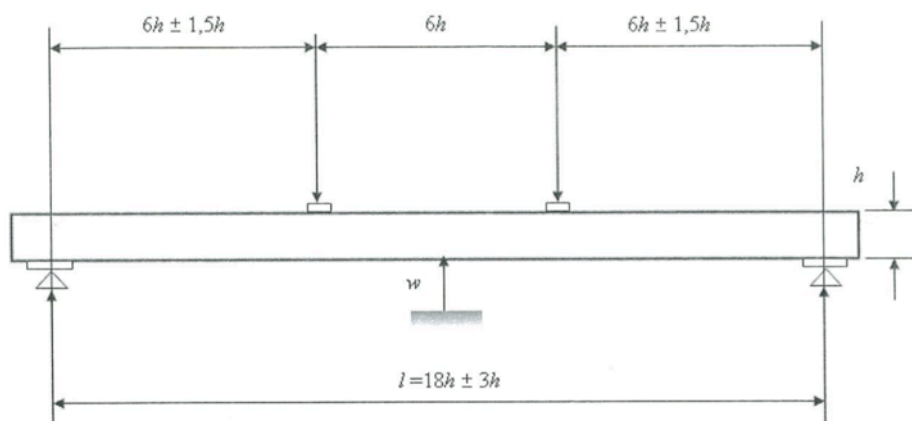


**Joonis 7.** Liimpuidu valmistamine Nordlum OÜ tootmishoones.

Järgmise etapina anti liimpuittaladele nelikanthöövliga lõplikud mõõtmed  $45 \times 150 \times 3000 \text{ mm}^3$  ning transporditi Eesti Maaülikooli konstruktsioonide laborisse.

### 2.1.3 Katsete käik

Katsed teostati vastavalt EVS-EN 408:2010+A1:2012 näidatud katsekorraldusskeemile (Joonis 8).



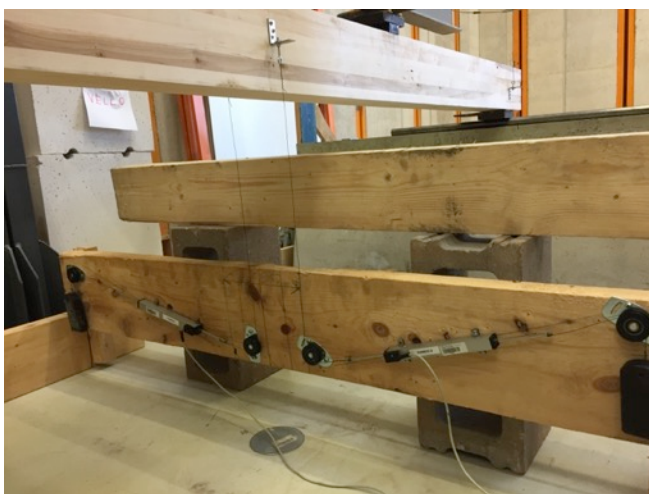
**Joonis 8.** Paindetugevuse mõõtmise katsekorraldus (EVS-EN 408:2010+A1:2012, 2012)

Hüdrosilindriga “Lukas” avaldati survet IPE talale, mis jaotas survepunktid liimpuidule sümmeetriliselt kaheks, vahekaugusega 900 mm, (Joonis 9). IPE talalt kanti jõud üle liimpuittalale terasvardaga läbimõõduga 40 mm ja terasplaadiga mõõtudega

100 x 150 mm<sup>2</sup>. Terasplaadi eesmärk oli vähendada puidus muljumisest tingitud deformatsioone. Liimpuittala toetus paremalt poolt liikuvale toele, mis oli kombineeritud vabalt liikuva terasvarda läbimõõduga 4 mm ja terasplaadiga mõõtudega 150 x 70 mm<sup>2</sup>. Vasakpoolne tugi koosnes jäigalt kinnitatud terasvardast ja terasplaadist. Tugele vahekauguseks oli 2700 mm. Nihkeandurid paigaldati selleks spetsiaalselt ette valmistatud puidust raketistele (Joonis 10). Nihkemõõtmised tehti liimpuittala kuuest punktist: vasakult eest, vasakult tagant, keskelt eest, keskelt tagant, paremalt eest ja paremalt tagant, kõikidel positsioonidel vertikaalsuunas tala keskkohast. Nii nihkeanduritest kui ka surveandurist tulevad andmed salvestas digitaalne andmesalvestaja (Almemo 5690-2) mälukaardile sekundilise intervalliga.



**Joonis 9.** Liimpuittala koormamine läbi IPE tala



**Joonis 10.** Keskmiste nihkeandurite paigutus

Pärast tala katseks ettevalmistamist, alustati koormamisega vastavalt Lisas 6 olevale koormamisskeemile kuni tala purunemiseni. Seejärel tehti purunemiskohtadest pildid ning eemaldati tala katseraketisest.

## **2.2 Liimpuidu survekatsed ristikiudu**

### **2.2.1 Katseseadmed**

Katsetes kasutati Eesti Maaülikooli ehitusmaterjalide labori hüdraulilist pressi Π-125, mille maksimaalne survejõud on 125 tonni ehk 1250 kN. Sama seadmega ühenduses oleva hüdraulilise ajami kaudu reguleeriti koormamise kiirust. Katseandmed salvestati arvutisse 0,5 sekundilise intervalliga. Niiskuse mõõtmiseks kasutati seadet Hydromette HT85T. Katsekehade mõõdud saadi digitaalse nihkekaliibriga. Katsekehad kaaluti digitaalse kaaluga 1% täpsusega.

### **2.2.2 Katsekehad**

Halli lepa liimpuidu survekatsel kasutati katsekehasid mõõtmetega 100 x 200 x 250 mm<sup>3</sup>. Mõõtmised valiti vastavalt EVS-EN:408.2010+A1:2012 nõuetele, mis on toodud Tabel 7. Katsekehad olid lõigatud liimpuittaladest, mis toodeti sarnaselt paindekatsel kirjeldatud liimpuidu tootmise tehnoloogiale. Ristikiudu liimpuidu survekatsel on ette nähtud standardis EVS-EN:408.2010+A1:2012 ristlõike kõrguseks 200 mm. Seetõttu olid katsekehad valmistatud kaheksast lamelist ning iga lamellikiht kuulus tugevusklassi D18. Sarnaselt paindekatsel oli katsekehadeks toodetud liimpuidu tugevusklass GL20h survetugevusega 20 N/mm<sup>2</sup>. Enne katsete alustamist olid katsekehad ruumis, mille temperatuur oli 20 °C ja suhteline õhuniiskus 65%. Enne katsete alustamist lihviti katsekehade pealmine ja alumine pind ketaslihvijaga, et nad oleksid paralleelsed, siledad ja teljega risti.

**Tabel 7.** Ehitus- ja liimpuidust katsekehade mõõtmised (EVS-EN 408:2010+A1:2012)

Katsekehade mõõtmised						
Ehituspuit			Liimpuit			
b (mm)	h (mm)	l (mm)	Maht m <sup>3</sup>	b x l (mm <sup>2</sup> )	b min (mm)	h (mm)
Tõmme						
45	180	70	0,01	25000	100	400
Surve						
45	90	70	-	25000	100	200

### 2.2.3 Katsete käik

Survekatsete eesmärgiks oli kindlaks määrata halli lepa liimpuidu survetugevus ristikiudu. Katsed sooritati vastavalt EVS-EN:408.2010+A1:2012 nõuetele, Eesti Maaülikooli ehitusmaterjalide laboris.

Katsekehad mõõdeti täpsusega 1%. Mõõdud võeti digitaalse nihkekaliibriga igast küljest kaks mõõtu. Seejärel katsekehad kaaluti ning mõõdeti niiskussisaldus kahes punktis.

Enne survekatsega alustamist tehti test proovikatsekehaga, et kindlaks määrata koormuse mõjumise kiirus ja deformatsiooni suurus. Kuna katseseadmel polnud võimalik digitaalselt koormamiskiirust määrata, tuli kiirus anda mehaaniliselt seadistades, vastavalt katsekehaga tehtud proovi tulemusele nii, et maksimaalne koormus saavutatakse 300 sekundi jooksul. Katse läbiviimine proovikehaga on näidatud Joonis 11.



**Joonis 11.** Liimpuidu survekatse

Joonisel 11 on näha nihkeandur, mis mõõdab katsekeha kokku surumist ning katsekeha, mis on asetatud surveplaatide vahele.

Kõigist katsekehadest tehti pildid enne katsete alustamist ja peale katsetamist neljast küljest, et hiljem oleks võrreldav, missuguseid deformatsioonid on puidus toimunud.

## **2.3 Paindekatsed väikeste katsekehadega**

### **2.3.1 Katseseadmed**

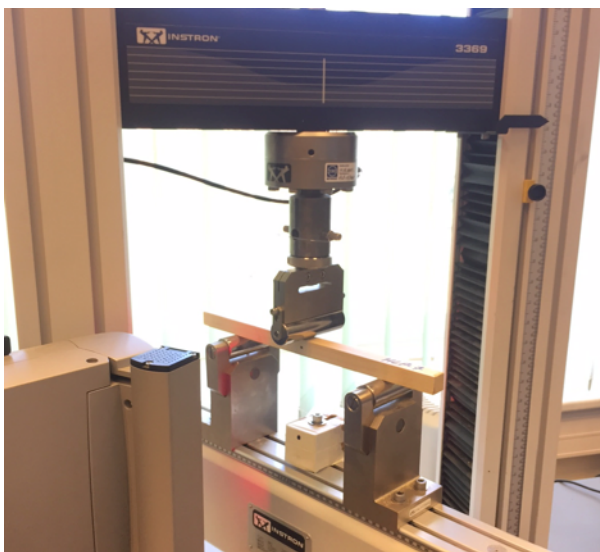
Katsed viidi läbi Eesti Maaülikooli metsatööstuse osakonna laboris. Halli lepa puidu paindekatseteks väikeste katsekehadega ( $20 \times 20 \times 380 \text{ mm}^3$ ) kasutati seadet INSTRON 3369, katsekehade mõõtmiseks digitaalset nihkekaliibrit ning kaalumiseks digitaalset kaalu.

### 2.3.2 Katsekehad

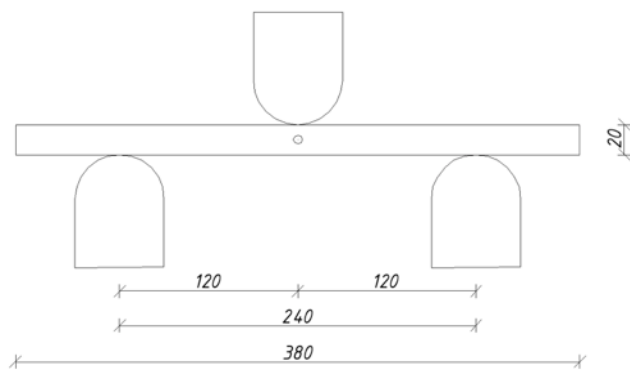
Vastavalt standardile ISO 3133 on valitud katsekehade mõõtudeks 20 x 20 x 380 mm<sup>3</sup>. Katsekehad on lõigatud laudadest mõõduga 100 x 40 x 3800 mm<sup>3</sup>. Platesaega lõigati toorikud 25 x 25 x 1500 mm<sup>3</sup> ning paksusmasinaga anti katsekehadele lõplik kõrgus ja laius. Niiskussisaldus oli enne laudade lahtilõikamist 11-12% mõõdetud seadmega GANN Hydromette M2050. Enne katseid lõigati toorikutest õige pikkusega, ilma okste ja defektideta 380 mm pikkused detailid.

### 2.3.3 Katsete käik

Halli lepa puidust tehtud väikeste katsekehade paindekatsete eesmärgiks on välja selgitada lepa puidu paindetugevus, elastsusmoodul ja deformatsioon. Katsed teostati vastavalt rahvusvahelisele standardile ISO 3133:1975 seadmega INSTRON 3369. Kasutati kolme punkti paindekatse meetodit Joonis 13. Katsekehad mõõdeti, kaaluti ja märgiti peale keskpunkt, mille järgi seade arvestab läbipainet. Vastavalt standardile on ette nähtud tugede vahekauguseks 12 kuni 16 katsekeha kõrgust ning tugede ja survepea kaare raadius 30 mm. Lähtudes nendest andmetest on käesoleva töö väikeste katsekehade paindekatse skeem toodud Joonis 13. Eeldatav maksimaalne jõud arvutati vastupanumomendi ja eeldatava pinge seosest. Peale paindekatse lõppu mõõdeti katsekehade niiskussisaldus vastavalt standardile ISO 3130:1975. Paindekatset teostati 20 katsekehaga.



**Joonis 12.** Kolme punkti paindekatse seadmega INSTRON



**Joonis 13.** Paindekatse skeem

Peale katseseadme INSTRON 3369 katseks ettevalmistamist, paigutati katsekeha tugelele nii, et märk katsekehal jääks täpselt tsentrisse. Tsentri täpselt määramiseks kasutatakse katseseadmest arvutisse tulevat reaalaajas pilti. Kui tsenter on kinnitatud, võib alustada katsega. Katseseade viib kogu katse läbi automaatselt, ning näitab jooksvalt jõu ja läbipaindegraafikut. Peale katsete lõppu määratakse katsekehade niiskussisaldus – selleks pannakse katsekehad kuivatusahju, kus need seisavad niikaua, et kuue tunniste kaalumiste vahel oleks kaalude erinevus vähem kui 1%. Niiskussisaldus määratakse standardis ISO 3130:1975 oleva valemi järgi (valem 4).

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100\% , \quad (4)$$

kus  $W$  – niiskussisaldus %;

$m_1$  – katsekeha mass enne kuivatamist g;

$m_2$  – katsekeha mass peale kuivatamist g.

## 2.4 Survekatsed ristikiudu väikeste katsekehadega

### 2.4.1 Katseseadmed

Katsed viidi läbi Eesti Maaülikooli metsateaduste laboris. Halli lepa puidu ristikiudu survekatsedeks kasutati seadet INSTRON 3369, katsekehade mõõtmiseks digitaalset nihkekaliibrit ning kaalumiseks digitaalset kaalu.

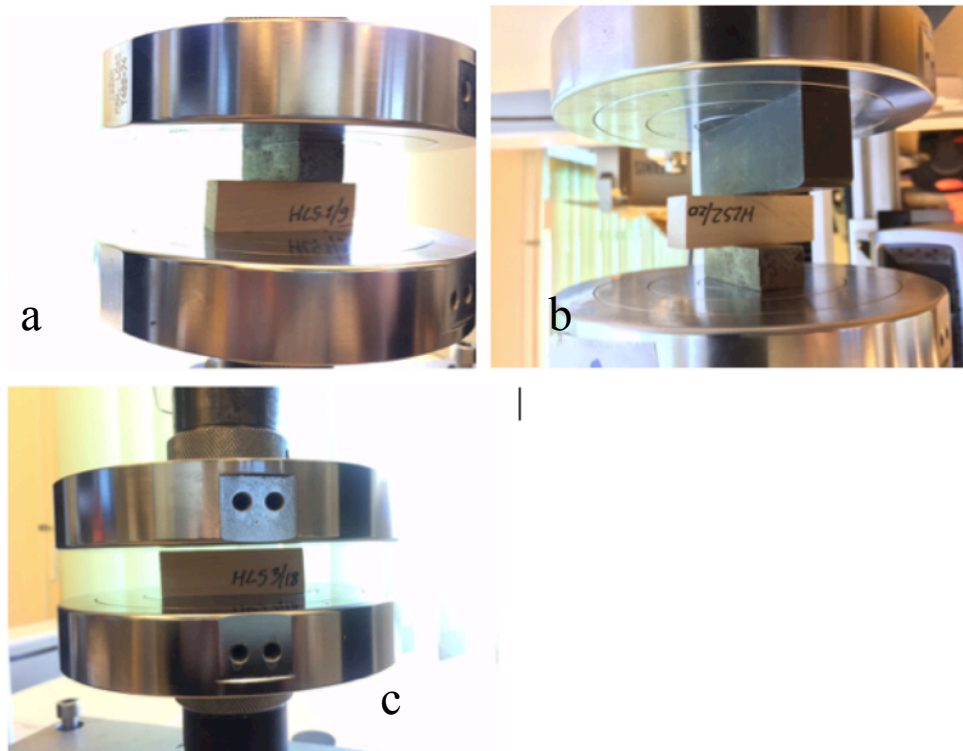
### 2.4.2 Katsekehad

Halli lepa puidu ristikiudu survekatseteks valiti vastavalt standardile ISO 3132 katsekehad mõõtudega  $20 \times 20 \times 60 \text{ mm}^2$ . Katsekehad valmistati vastavalt paindekatsel kirjeldatud meetodile, oksa ja defektide vabast materjalist kokku 60 tk.

### 2.4.3 Katsete käik

Katsete eesmärgiks on kindlaks määrata halli lepa vigadeta puidu survetugevus ristikiudu. Katsete käigus mõõdetakse halli lepa survetugevust kolmel erineval meetodil:

1. Surudes katsekeha keskelt 20 mm laiuse terasprismaga ja katsekeha alune pind on täielikult toetatud (Joonis 14 a).
2. Surudes katsekeha 20 mm laiuste terasprismadega kahelt poolt keskelt (Joonis 14 b).
3. Surudes katsekeha mõlemalt poolt täisristlõike ulatuses (Joonis 14 c).



Joonis 14. Väikeste katsekehadega survekatsed



Erinevad katseskeemid on kasutusel, et hiljem võrrelda puidu käitumist surve erinevates olukordades ning võrrelda neid liimpuidu survevõimega.

Katsed teostati seadmega INSTRON 3369 ja vastavalt standardile ISO 3132 ja GOST 6483. Enne katsete algust katsekehad nummerdati, mõõdeti ja kaaluti. Iga meetodi jaoks oli ette nähtud 20 katsekeha mõõduga  $20 \times 20 \times 60 \text{ mm}^3$ . Katsekehadele rakendati koormust nii, et maksimaalne deformatsioon 1,5 mm saavutati ligikaudu 120 sekundiga. Katseseade mõõtis deformatsiooni ja rakendatavat jõudu 0,05 sekundilise intervalliga. Peale katsete lõppu määratakse katsekehade niiskussisaldus – selleks pannakse katsekehad kuivatusahju, kus need seisavad niikaua, et kuue tunniste kaalumiste vahel oleks kaalude erinevus vähem kui 1%. Niiskussisaldus määratakse standardis ISO 3130 oleva valemi järgi.

### 3 KATSETE TULEMUSED JA ANALÜÜS

#### 3.1 Statistiline andmetöötlus

Katsetest saadud andmete töötlemiseks kasutati programmi MS Exel 2011, millega koostati graafikud, leiti keskmised ja protsentiilid. Lisaks kasutati veel vabavarana allalaetavat statistilise andmetöötluse programmi “R”, millega kontrolliti katsetulemuste normaaljaotust, kasutades Shapiro-wilk testi.

#### 3.2 Liimpuittalade painde katsetulemused

Liimpuittalade paindekatsel purustati 11 katsekeha, et teada saada halli lepa liimpuidu paindetugevus ja painde elastsusmoodul. Juba katsete käigus oli näha, et talade tugevused varieeruvad küllaltki palju. Ka visuaalselt oli näha nõrgematel taladel puidu ebakorrapärasusi tõmbetsoonis (Joonis 15). Nagu näha purunemispiltidelt, (Lisa 5), purunesid kõik katsekehad tõmbetsoonist ning purunemine toimus talade puitosas ilma liimvuuki pikkisuunas lõhkumata. Sellest võib järeldada, et valitud liim, mille andmed on toodud lisas 3 ning käesolevas töös kasutatud liimpuidu tootmistehnoloogia on hallile lepale sobilikud.



**Joonis 15.** Tala HLL/TP-9 purunemispilt

### 3.2.1 Arvutuslik maksimaalne jõud

Kuna lamellid olid tugevusklassiga D18, siis vastavalt Tabel 1 on liimpuidu tugevusklass GL20h, millele vastav paindetugevus on vastavalt Tabel 6  $20 \text{ N/mm}^2$  ja elastsusmoodul  $8400 \text{ N/mm}^2$ . Arvutades maksimaalse momendi valemi 3 järgi, saadi maksimaalseks survejõuks programmiga F-tool  $7,9 \text{ kN} \times 2$  nagu näidatud Joonis 16. Vastupanumomendi arvutamiseks kasutati valemit 5.

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (5)$$

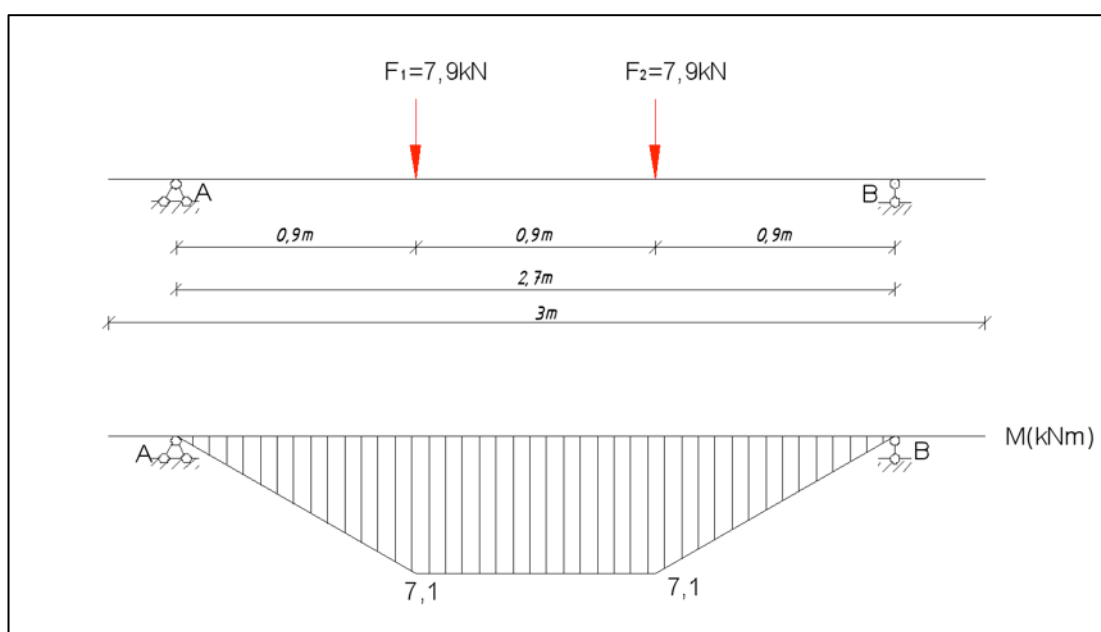
kus  $W$  – vastupanumoment  $\text{mm}^3$ ;

$b$  – ristlõike laius mm;

$h$  – ristlõike kõrgus mm.

Maksimaalse paindemomendi arvutus:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M}{W} \rightarrow M = \sigma_{m,d} \cdot W \rightarrow M = 20 \cdot 351778 \cdot 10^{-6} = 7,1 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



**Joonis 16.** Liimpuidu paindekateses kasutatav koormamisskeem ja maksimaalne paindemomendiepüür

### 3.2.2 Katsete tulemusel saadud paindetugevus ja elastsusmoodul

Paindekatsel saadud hüdrosilindri surve ja nihkeandurite andmete järgi arvutati talale mõjuv jõud ning läbipainded. Kasutades EVS-EN 408:2010+A1:2012 antud valemeid, oli eelnevate andmete järgi võimalik välja arvutada maksimaalne paindetugevus, valem 7 ja globaalne elastsusmoodul, valem 6. Tulemused on toodud Tabelis 8.

$$E_{m,g} = \frac{3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3}{2 \cdot b \cdot h^3 \left( 2 \cdot \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)}, \quad (6)$$

kus  $E_{m,g}$  – globaalne elastsusmoodul N/mm<sup>2</sup>;  
a – tugede vaheline kaugus mm;  
l – sille mm;  
b – ristlõike laius mm;  
h – ristlõike kõrgus mm;  
 $F_2 - F_1$  – koormuse juurdekasv N;  
 $w_2 - w_1$  – läbipainde juurdekasv, mis vastab koormuse juurdekasvule mm;  
G – nihkemoodul N/mm<sup>2</sup>.

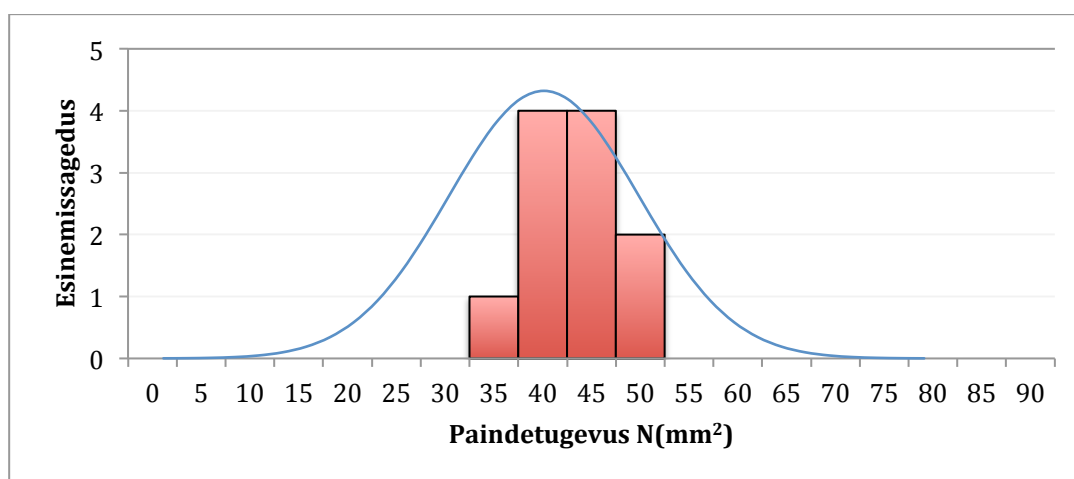
$$f_m = \frac{3 \cdot F \cdot a}{b \cdot h^2}, \quad (7)$$

kus F – jõud N;  
a – kaugus koormuse rakenduspunkti ja lähima toe vahel mm;  
b – ristlõike laius mm;  
h – ristlõike kõrgus mm.

**Tabel 8.** Paindemoment, läbipaine, paindetugevus ja elastsusmoodul katsekehade kaupa

Tala nr.	Maksimaalne moment [kNm]	Maksimaalne läbipaine [mm]	Maksimaalne paindetugevus $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Elastsusmoodul E [N/mm <sup>2</sup> ]
HLLP/TP-1	18,9	62,8	53,9	11378
HLLP/TP-2	11,5	36,8	33,1	12246
HLLP/TP-3	14,5	50,5	41,6	12434
HLLP/TP-4	17,9	71,8	51,2	12551
HLLP/TP-5	16,2	48,6	45,9	13267
HLLP/TP-6	11,1	33,9	31,5	12216
HLLP/TP-7	16,4	55,6	46,6	12326
HLLP/TP-8	11,2	37,9	31,9	12302
HLLP/TP-9	16,8	68,5	47,8	11851
HLLP/TP-10	11,7	43,4	33,8	11177
HLLP/TP-11	9,5	32,5	27,0	11709
<b>Keskmine</b>	<b>14,2</b>	<b>46,3</b>	<b>40,4</b>	<b>12133</b>

Katsetulemuste alusel koostatud graafikult (Joonis 17) on näha, et katsetulemused vastavad normaaljaotusele. Lisaks kontrolliti ka programmiga R katsetulemuste vastavust normaaljaotusele, mis andis P väärtuseks 0,31 – ka sellest järeldub, et katsetulemused vastavad normaaljaotusele.



**Joonis 17.** Liimpuidu paindekatsete normaaljaotus

Tabelist 8 on näha, et kuigi maksimaalsed paindetugevused varieeruvad palju, on nad kõik märkimisväärselt suuremad kui arvutuslikud paindetugevused. Võrreldes (Fink jt 2013)

tehtud tööga, (Tabel 4) kus on kuuse puidust GL24h tugevusklassiga liimpuidu maksimaalsete paindetugevuste keskmiseks saadud  $30,1 \text{ N/mm}^2$ , on halli lepa antud näitaja 35% suurem. Elastsusmoodul on halli lepa liimpuidul eelneva tööga võrreldes 8% suurem.

Võrreldes Muraleedharan ja Reiterer 2016. aastal tehtud tööga (Tabel 5), kus kuuse puidust tehtud liimpuittalade keskmiseks paindetugevuseks saadi  $35,86 \text{ N/mm}^2$ , on lepa puidust liimpuittalade sama näitaja  $40,38 \text{ N/mm}^2$  ehk 11% suurem.

Normatiivne väärtus on kõigi katsetulemuste järjestusest võetud väärtus, millest 5% tulemustest on madalamad (Just jt. 2015). Paindetugevuse normatiivne väärtus on käesolevas töös arvutatud vastavalt standardile EVS-EN 384:2010. Tabelis 6 olevate maksimaalsete paindetugevus väärtuste järgi arvutades on halli lepa liimpuidu normatiivseks paindetugevuseks ( $f_{m,g,k}$ )  $29,25 \text{ N/mm}^2$ . Eelnev väärtus on 31,6% suurem kui T11 lamellide järgi Tabelist 1 võetud tugevusklassile vastav liimpuidu paindetugevus. T11 on uuritavate liimpuittalade lamellide tugevusklass tõmbetugevuse järgi, mis vastab EVS-EN 338:2009 järgi tugevusklassile D18.

Vastavalt EVS – EN 14080:2013 järgi on võimalik liimpuidu normatiivne paindetugevus arvutada ka lamellide tõmbetugevuse järgi (valem 8).

$$f_{m,g,k} = -2,2 + 2,5 \cdot f_{t,0,l,k}^{0,75} + 1,5 \cdot \left( \frac{1,4 \cdot f_{t,o,l,k}}{1,4} - f_{t,o,l,k} + 6 \right)^{0,65}, \quad (8)$$

kus  $f_{m,g,k}$  – liimpuidu normatiivne paindetugevus;

$f_{t,0,l,k}$  – lamelli normatiivne tõmbetugevus  $\text{N/mm}^2$ .

Antud valemi järgi arvutades saadi liimpuidu normatiivseks paindetugevuseks ( $f_{m,g,k}$ )  $21,46 \text{ N/mm}^2$ . Eelnev väärtus on kõigist prognoositavatest väärtustest kõige lähem katsete tulemusel saadud normatiivsele survetugevusele. Lisaks kontrolliti ka programmiga R katsetulemuste vastavust normaaljaotusele, mis andis P väärtuseks 0,31. Sellest järeldub, et katsetulemused vastavad normaaljaotusele.

### 3.3 Liimpuidu survekatsete tulemused

Survekatseteks kasutati 11 liimpuidust katsekeha, mõõtmetega 100 x 200 x 250 mm<sup>3</sup>. Katsekehad suruti kokku 20 mm ulatuses. Koormus igale katsekehale oli ligikaudu 100 kN, selle koormuse juures hakkasid juba puidu kiud deformeeruma ja edasine survestamine polnud enam vajalik. Maksimaalne surve saavutati ligikaudu 300 sekundi jooksul.

#### 3.3.1 Ristikiudu survetugevuse ja elastsusmooduli leidmine

Katseseade salvestas arvutisse jõu ja deformatsiooni iga 0,5 sekundi tagant – antud andmete järgi arvutati igale katsekehale survetugevus ristikiudu vastavalt EVS-EN 408:2010+A1:2012 le. Survetugevus arvutatakse valemi 9 järgi.

$$f_{c,90} = \frac{F_{c,90,max}}{b \cdot l}, \quad (9)$$

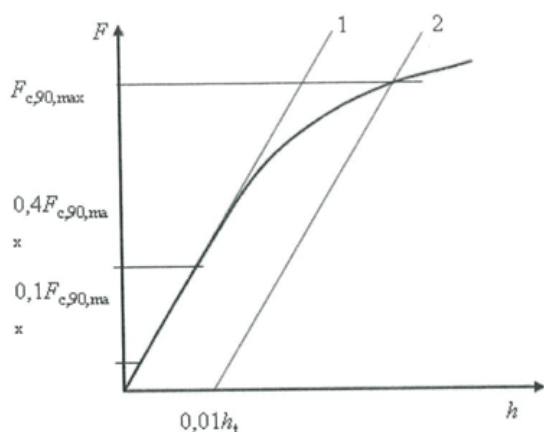
kus  $f_{c,90}$  – survetugevus ristikiudu N/mm<sup>2</sup>;

$F_{c,90,max}$  – maksimaalne jõud N;

$b$  – katsekeha laius mm;

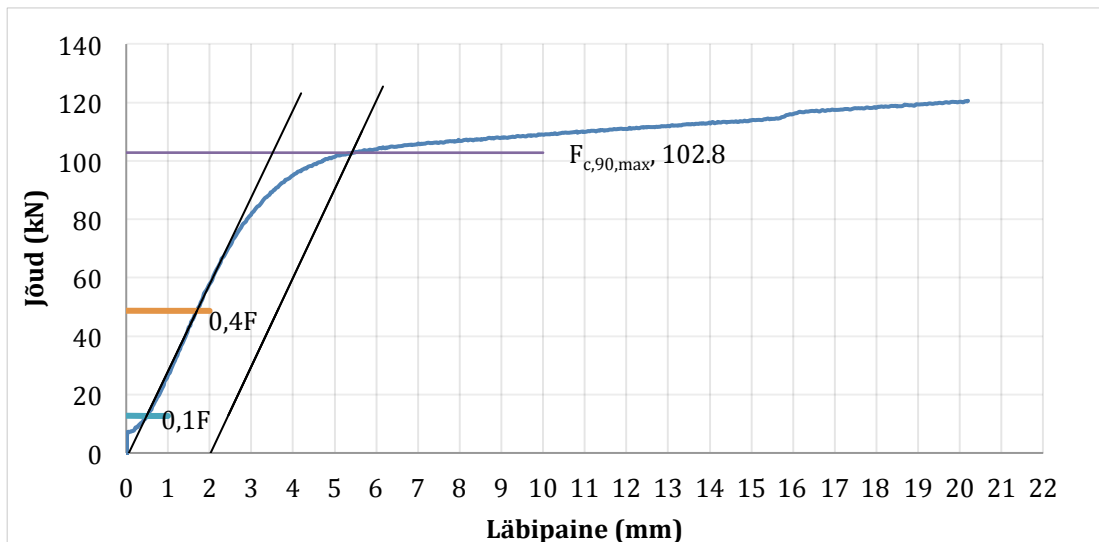
$l$  – katsekeha pikkus mm.

Survetugevus arvutatakse 1% täpsusega ja  $F_{90,max}$  leitakse vastavalt graafikule (Joonis 18)



**Joonis 18.** Koormuse läbipainde graafik survel ristikiudu (EVS-EN 408:2010+A1:2012)

Katsetulemuste põhjal koostatakse koormuse läbipainde graafik, millele lisatakse vastavalt punktidele 0,4F ja 0,1F sirge. Antud sirgele tõmmatakse paralleelsirge, mis asub esimesest sirgest 0,01 katsekeha kõrgusmõõdu kaugusel (EVS-EN 408:2010+A1:2012). Punkti väärtus, kus sirge lõikub läbipainde kõveraga, on antud katsel  $F_{c,90,max}$ , mida võib kasutada survetugevuse määramiseks (Joonis 19).



**Joonis 19** Koormuse läbipainde graafik. Liimpuit-katsekeha nr. HLLP/SR-7 survetugevuse leidmine.

Elastusmoodul ristikiudu survel leitakse valemiga 10.

$$E_{c,90} = \frac{(F_{40} - F_{10}) \cdot h}{(w_{40} - w_{10}) \cdot b \cdot l} , \quad (10)$$

kus  $F_{40} - F_{10}$  – koormuse juurdekasv n;  
 $w_{40} - w_{10}$  – koormuse juurdekasvule vastav deformatsiooni juurdekasv mm;  
 $h$  – ristlõike kõrgus mm;  
 $b$  – ristlõike laius mm;  
 $l$  – katsekeha pikkus mm.

Antud valemite ja meetoodika järgi saadi kõigi katsekehade survetugevused ja elastsusmoodulid, mis on toodud Tabel 9.



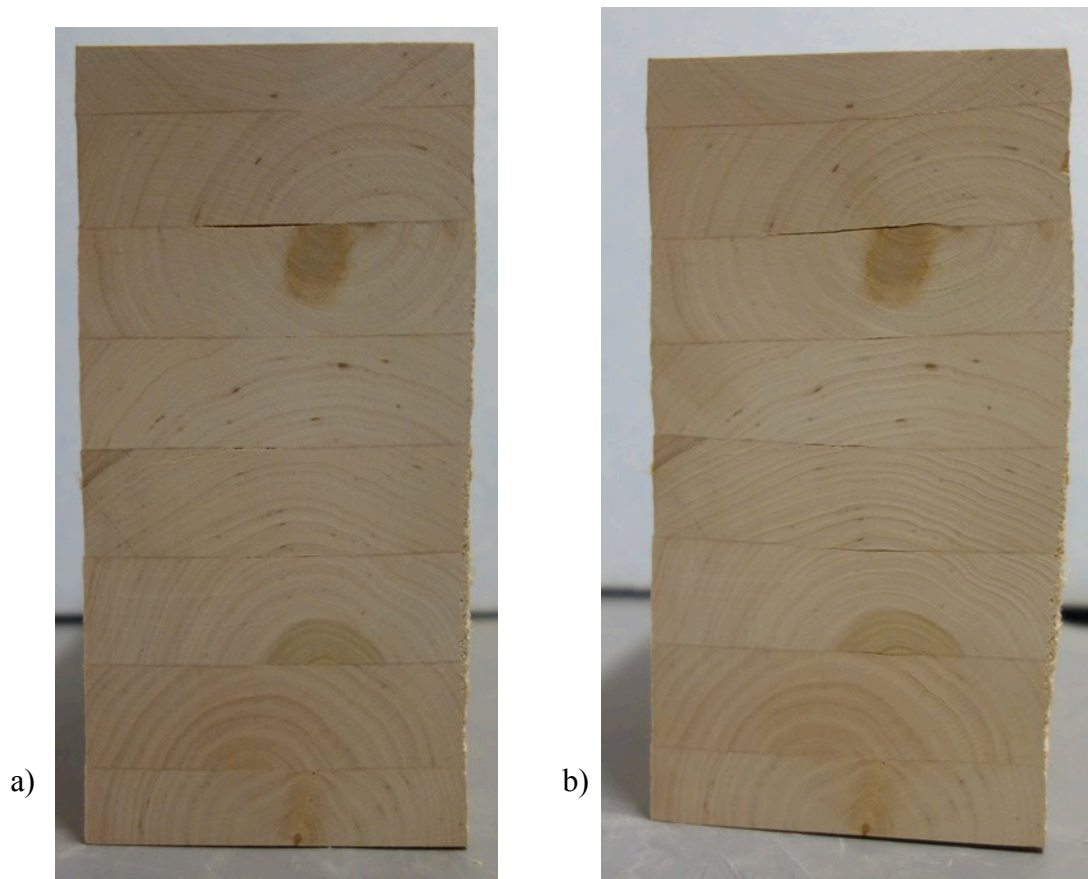
**Tabel 9.** Liimpuidu ristikiudu survekatsete tulemused

Katsekeha nr.	$F_{c,90,g,max}$	$f_{c,90,g}$	$E_{c,90,g}$	Tihedus $\rho$
	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
HLLP/SR-1	103,6	4,25	241,0	420
HLLP/SR-2	102,9	4,23	242,0	418
HLLP/SR-3	105,2	4,31	240,7	417
HLLP/SR-4	102,9	4,23	242,2	419
HLLP/SR-5	98,3	4,09	243,6	416
HLLP/SR-6	102,7	4,22	240,8	416
HLLP/SR-7	102,8	4,23	241,3	418
HLLP/SR-8	101,6	4,17	240,6	415
HLLP/SR-9	103,9	4,30	241,7	417
HLLP/SR-10	106,9	4,38	238,8	427
HLLP/SR-11	100,5	4,15	240,2	414
<b>Keskmine</b>	<b>102,8</b>	<b>4,23</b>	<b>247,17</b>	<b>418,06</b>

Tabelist 9 on näha, et survetugevus ristikiudu on küllaltki ühtlane ja ei esine suuri kõrvalekaldeid, sama võib öelda ka elastsusmooduli kohta. Saadud tulemuste järgi on liimpuidu normatiivne survetugevus ristikiudu ( $f_{c,90,g,k}$ ) 4,12 N/mm<sup>2</sup>. See on peaaegu poole suurem kui standardis EVS-EN 14080:2013 ette nähtud. Normatiivne survetugevus on võetud reastatud katsetulemuste kogumi alumise 5-protsentiili väärtusena.

### 3.3.2 Liimpuidu ristikiudu survetugevuskatsete tulemuste analüüs

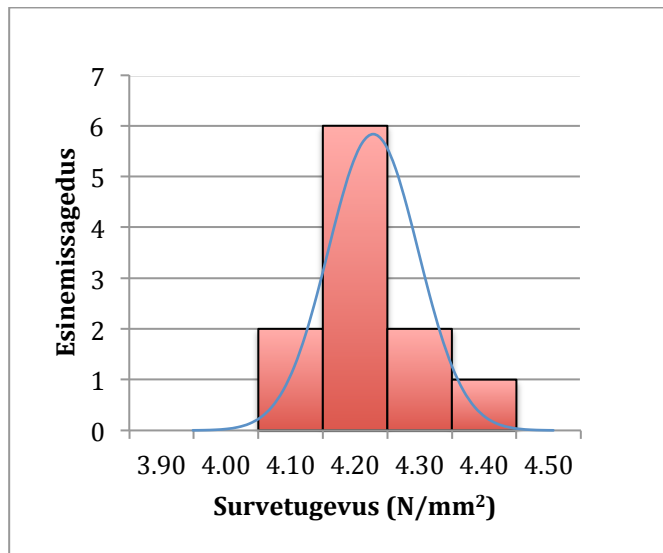
Liimpuidust katsekehad suruti kokku 20 mm ulatuses, selleks hetkeks hakkasid puidul juba tekkima deformeerumise märgid. Puidu kiud hakkasid pikema külje pealt välja pressima, otsast vaadatuna muutus katsekeha kõveraks ning lamellide kihid olid üksteise suhtes ebakorrapäraselt kokku surutud. Joonis 20 a on näidatud katsekeha enne katset ja Joonisel 20 b peale katset.



**Joonis 20.** Liimpuidu survekatse katsekeha HLLP\_SR/5: a) pilt enne katset b) pilt peale katset: (foto Martti-Jaan Miljan 2017)

Ülal oleval fotol on näha, kuidas suure surve (100 kN) tagajärjel on puidu kiud kokku surutud ning lamellid muutunud kõveraks ja eripaksuseks.

Joonisel 21 olevalt graafikult on näha, et katsetulemused vastavad normaaljaotusele. Lisaks on kontrollitud ka normaaljaotusele vastavust programmiga “R” – kasutades Shapiro-wilk testi, saadi  $p$  väärtuseks 0,91, mis näitab, et katsetulemused on normaaljaotusega.



**Joonis 21.** Liimpuidu survekatsete katsetulemuste normaaljaotuskõver

Katsetulemustest järeldub, et halli lepa liimpuidu normatiivne survetugevus vastab EVS-EN 14080:2013 normile ja on isegi peaaegu poole suurem.

### 3.4 Väikeste katsekehadega paindekatsete tulemused

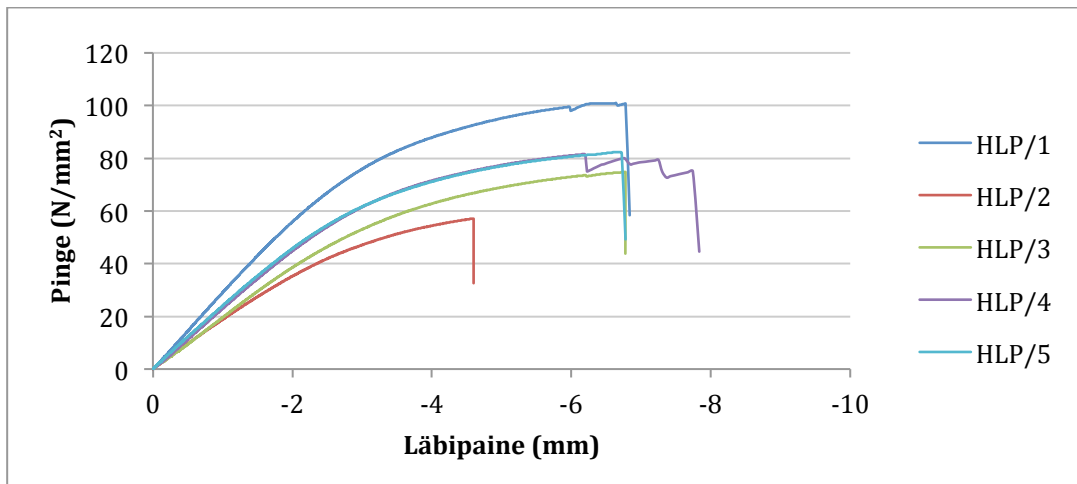
Paindekatsetes kasutati halli lepa vigadeta puidust katsekehasid, mõõtmetega  $20 \times 20 \times 380 \text{ mm}^3$ . Kokku viidi läbi 20 katset ning kasutati standardit ISO 3133. Katseseade INSTRON salvestas andmed iga 0,05 sekundi järel ning arvutas ka iseseisvalt paindetugevuse, elastsusmooduli ja läbipainde. Katsetest saadud maksimaalsed paindetugevused ja elastsusmoodulid on näha Tabel 10. Tulemustest selgub, et paindetugevus ei ole väga ühtlane - minimaalne  $57,14 \text{ N/mm}^2$  ja maksimaalne  $103,03 \text{ N/mm}^2$ . Saadud andmed on võrreldavad ka Lätis tehtud tööga (Pavlovics jt. 2010) (Tabel 3), kus on saadud halli lepa keskmiseks paindetugevuseks  $55,46 \pm 4,46 \text{ N/mm}^2$  tüve alumises osas ja  $64,39 \pm 2,80 \text{ N/mm}^2$  tüve  $\frac{1}{4}$  osas. Nimetatud töös on kasutatud paindetugevuse määramiseks samu meetodeid ja samade mõõtmetega katsekehasid nagu käesolevas töös.

**Tabel 10.** Halli lepa vigadeta puidu väikeste katsekehadega paindekatsete tulemused

Katsekeha nr	Tihedus $\rho$	Niiskussisaldus w	Elastsusmoodul E	Paindetugevus $f_m$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
HLP-1	486	11,34	11493	100,9
HLP-2	344	11,64	7569	57,1
HLP-3	409	11,24	7785	74,8
HLP-4	406	11,14	9250	81,6
HLP-5	405	10,71	9468	82,4
HLP-6	405	11,34	8206	71,0
HLP-7	414	11,40	8910	82,4
HLP-8	481	11,36	11032	98,9
HLP-9	455	11,26	10595	88,9
HLP-10	357	11,03	7693	65,7
HLP-11	457	11,60	10085	88,4
HLP-12	412	11,22	9074	73,4
HLP-13	479	11,45	10782	98,9
HLP-14	406	11,54	7616	62,5
HLP-15	481	11,67	11687	94,6
HLP-16	353	10,69	11355	64,6
HLP-17	472	11,33	7569	103,0
HLP-18	487	11,73	8164	96,4
HLP-19	351	11,32	7569	60,2
HLP-20	348	11,13	8164	63,7
<b>keskmine</b>	<b>420</b>	<b>11,31</b>	<b>9352</b>	<b>82,5</b>

Võrreldes väikeste katsekehade keskmist paindetugevust liimpuiduga on vahe 49%. Nii suure erinevuse tingib liimpuidus olevate okste ja ebakorrapärasuste esinemine. Suur paindetugevuse erinevus liimpuidus ja halli lepa saepuidus on seletatav ka asjaoluga, et liimpuidust katsekehad olid valmistatud laudadest tugevusklassiga D18.

Joonis 22 on näidatud esimese viie katsekeha pingeläbipainde graafikud. Graafikult on näha, et paindepinge varieerub küllaltki palju. Kõikide paindekatsete graafikud on toodud Lisas 8.

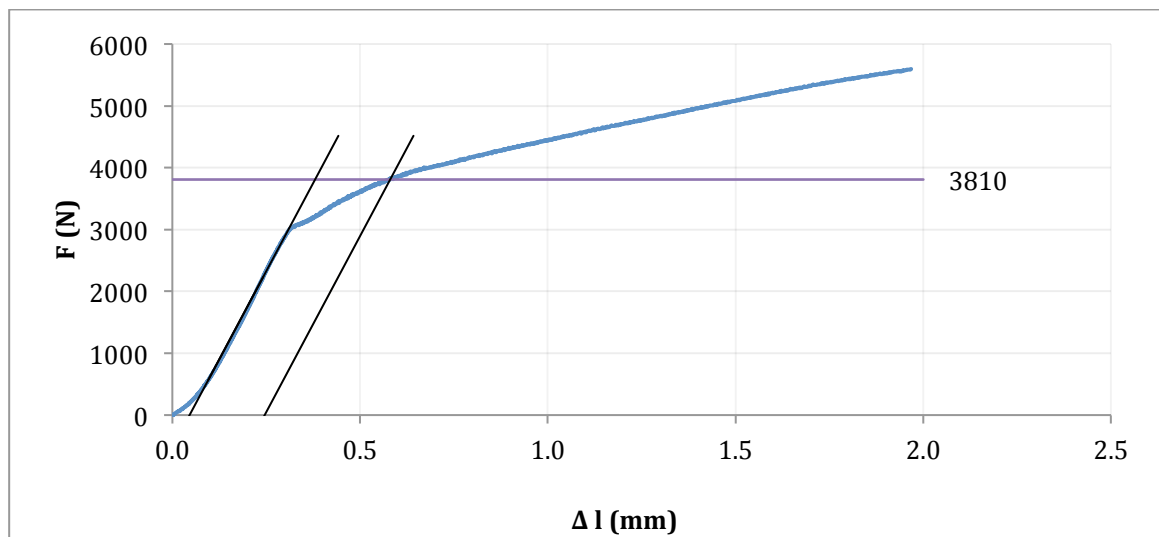


**Joonis 22.** Halli lepa puidu paindekatsete pinge-läbipaindegraafik

Joonisel 22 on kõige väiksema paindetugevusega katsekeha HLP/2 ja kõige suurema paindetugevusega katsekeha HLP/1. Katsekehadele vastavad tihedused on 343,8 ja 485,65 kg/m<sup>3</sup>, millest saab järeldada, et paindetugevuse suur kõikumine on tingitud katsekehade erinevast tihedusest. Visuaalsel vaatlusel pole katsekehadel mingeid erinevusi märgata. Purunemispildid on välja toodud Lisas 7.

### 3.5 Väikeste katsekehadega survekatsete tulemused

Survekatseid halli lepa puiduga tehti käesoleva töö käigus kolmel erineval meetodil. Kõikidel meetoditel rakendati jõudu kiudude suunaga ristipidiselt. Saadud tulemusi võrreldi omavahel ja võrreldi ka liimpuidu survekatsete tulemustega. Survetugevus ristikiudu on leitud katsetulemustel saadud koormuse läbipainde graafiku järgi nagu näidatud Joonis 23 ning lisaks ka EVS-EN 338:2016 antud tiheduse ja survetugevuse seose järgi.



**Joonis 23.** Koormuse-läbipainde graafik. Katsekeha HLS1/1 survetugevuse määramine.

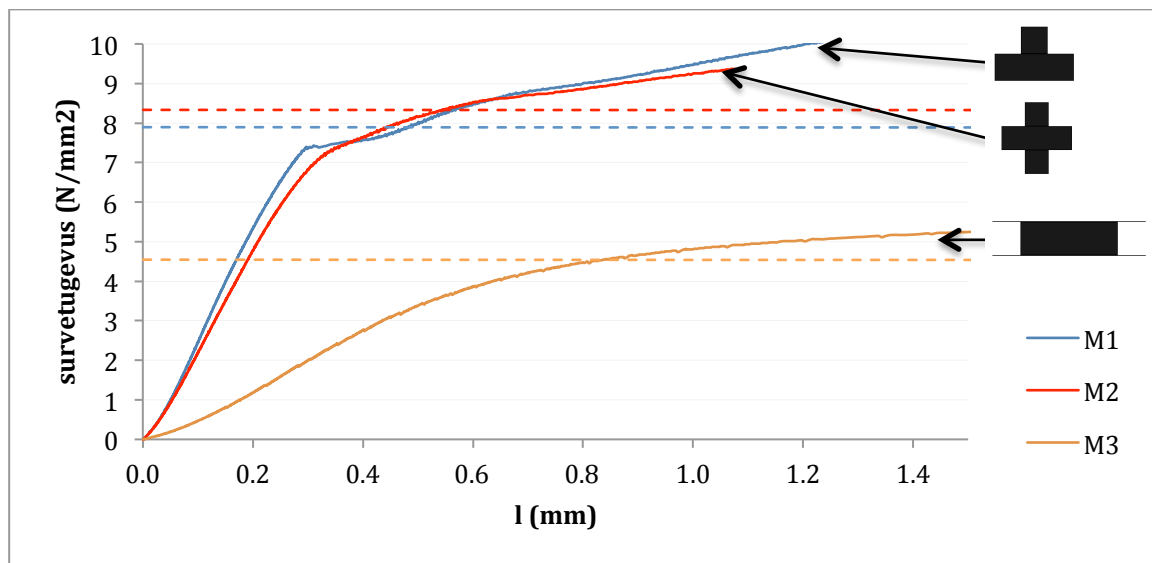
Edaspidiste katsetulemuste kirjeldamise lihtsustuseks on erinevad survekatsetel kasutatud meetodikad nummerdatud järgmiselt:

1. Surudes katsekeha keskelt 20 mm laiuse terasprismaga ja katsekeha alune pind on täielikult toetatud (Joonis 14 a). Edaspidi M1.
2. Surudes katsekeha 20 mm laiuste terasprismadega kahelt poolt keskelt (Joonis 14 b). Edaspidi M2.
3. Surudes katsekeha mõlemalt poolt täisristlõike ulatuses (Joonis 14 c). Edaspidi M3.

Kirjeldatud meetodikatest andis kõige suurema survetugevuse  $8,16 \text{ N/mm}^2$  M1 (Tabel 11). Suhteliselt kõrge olid ka katsetulemused M2 meetodikaga. Kolmas meetodika on võrreldav liimpuidu survekatsetega, kuna survet avaldati kogu katsekeha ülemise ja alumise pinna ulatuses. Liimpuidu keskmine survetugevus oli  $4,23 \text{ N/mm}^2$ , mis on M3 meetodika tulemustest  $0,77 \text{ N/mm}^2$  võrra väiksem. Eelnevast võib järeldada, et liimpuidu survetugevus on küllaltki sarnane vigadeta puidu survetugevusega, kui kasutada survetugevuse määramiseks M3 meetodikat (survet avaldatakse kogu katsekeha ülemise ja alumise pinna ulatuses). Erinevate meetodikate tulemus on võrdlemiseks pandud graafikule Joonisel 24, kus katsekehad on valitud võimalikult sarnaste tihedustega. Kõikide survekatsete katsekehade tulemused on näidatud Lisas 9.

**Tabel 11.** Halli lepa survekatsete keskmised tulemused metoodikate kaupa

Metoodika	Katsekehade arv [tk]	Survetugevus $F_{c,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Tihedus $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Niiskussisaldus $w$ [%]
M1	20	8,16	451,41	10,65
M2	20	7,19	446,13	10,65
M3	20	5,00	476,50	10,92



**Joonis 24.** Erinevate metoodikatega survekatsete tulemuste võrdlus (valitud on sarnaste tihedustega katsekehad)

Tiheduse järgi survetugevuse määramiseks kasutati valemit  $f_{c,90}=0,015\rho_k$  (EVS-EN 338:2009). Eelneva valemi järgi saadud tulemused on toodud Tabel 12.

**Tabel 12.** Halli lepa normatiivne survetugevus tiheduse järgi arvutades

Metoodika	Katsekehade arv [tk]	Keskmine survetugevus $F_{c,90,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Keskmine tihedus $\rho_k$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Keskmine niiskussisaldus $w$ [%]
M1	20	5,68	378,96	10,65
M2	20	5,83	388,89	10,65
M3	20	6,32	421,43	10,92

Märkus. Kasutatud on erinevates metoodikates olnud katsekehade keskmist tihedust ja keskmist niiskussisaldust.

Kuna standardis EVS-338:2009 on antud puidu normatiivne survetugevus, siis järgnevalt on ka näidatud katsete põhjal saadud normatiivsed survetugevused halli lepa puidule.

**Tabel 13.** Katsetulemuste järgi saadud halli lepa ristikiudu survetugevuse ja tiheduse normatiivsed väärtused

Metoodika	Katsekehade arv [tk]	Survetugevus $F_{c,90,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Tihedus $\rho_k$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Niiskussisaldus $w$ [%]
M1	20	5,77	378,96	10,65
M2	20	4,12	388,89	10,65
M3	20	3,8	421,43	10,92

Eelnevate survetugevuse tabelite põhjal võib järeldada, et halli lepa normatiivne survetugevus (3,8 N/mm<sup>2</sup>), mis on mõõdetud M3 metoodika abil, on kõige lähedasem liimpuidu normatiivsele survetugevusele. Määrates tiheduse järgi survetugevust, saadakse lähedane väärtus M1 ja M2 metoodikaga saadud survetugevusele. Seevastu aga M3 metoodikaga saadud tulemus on poole väiksem, kui tiheduse järgi arvutatud survetugevus.



## KOKKUVÕTE

Hall lepp (*Alnus incana*) on Eesti metsades väga laialdaselt levinud, kuid vähe väärtustatud puuliik. Arvestades halli lepa suurt ressursi, oleks vaja leida sellele puuliigile uusi rakendusi. Käesolevas töös on uuritud halli lepa sobivust liimpuidu valmistamiseks, keskendudes tema tugevusomadustele nii paindel kui ka survel ristikiudu. Lisaks on uuritud ka halli lepa vigadeta puidu tugevusomadusi ning nende seost tiheduse ja niiskusega, kuna nendest näitajatest sõltuvad ka liimpuidu omadused.

Halli lepa taladega teostati paindekatsed ja survekatsed ristikiudu vastavalt standardile EVS-EN 408:2010+A1:2012. Paindekatsetes kasutati 11 liimpuittala mõõtmetega  $95 \times 150 \times 3000 \text{ mm}^3$ . Liimpuit valmistati 27 mm paksustest D18 tugevusklassi kuuluvatest lamellidest. Liimiks kasutati polüuretaanalusel liimi Makroplast UR 7225.

Paindekatsed halli lepa liimpuiduga teostati Eesti Maaülikooli laboris. Kasutati nelja punkti paindekatse skeemi. Paindekatsete tulemusel saadi keskmiseks paindetugevuseks ( $f_{m,g}$ )  $40,38 \text{ N/mm}^2$  ning normväärtuseks ( $f_{m,g,k}$ )  $29,25 \text{ N/mm}^2$ . Saadud tulemused on suuremad, kui eeldatud halli lepa liimpuidu paindetugevus. Samuti on ka paindetugevuse keskmine väärtus oluliselt suurem, kui varem teistes töodes uuritud kuuse liimpuidu keskmine väärtus. Ainsa miinusena on leitud halli lepa liimpuidu paindetugevuse suur varieeruvus, mis on tingitud okste sattumisest tala tõmbetsooni.

Et võrrelda halli lepa liimpuidu paindetugevust ilma liimita puiduga, teostati vigadeta halli lepa puidu paindekatsed vastavalt rahvusvahelisele standardile ISO 3133. Katsekehadeks olid 20 halli lepa puidust lõigatud oksteta ja vigadeta  $20 \times 20 \times 280 \text{ mm}^3$  detaili. Paindekatsed teostati seadmega INSTRON 3369 ning kasutati kolme punkti meetodit. Saadud tulemustest arvutati maksimaalne paindepinge ja elastsusmoodul. Saadud tulemustest oli näha, et halli lepa paindetugevus ei ole väga ühtlane – minimaalne väärtus  $57,14 \text{ N/mm}^2$  ja maksimaalne väärtus  $103,03 \text{ N/mm}^2$ . Suured erinevused paindetugevuses on kooskõlas ka tiheduse kõikumisega.

Liimpuidu ristikiudu survekatsed teostati liimpuidust katsekehadega, mille mõõdud olid  $100 \times 200 \times 250 \text{ mm}^3$ . Katsekehad olid toodetud sarnaselt paindekatsel kasutatud katsekehadega. Survekatsed viidi läbi vastavalt standardile EVS-EN 408:2010+A1:2012. Liimpuidust katsekehale avaldati survet kogu pinna ulatuses niikaua, kuni kõrguse muut oli 20 mm. Saadud tulemustest koostati koormuse läbipainde graafikud, mille alusel oli võimalik määrata liimpuidu survetugevus ristikiudu ( $f_{c,90,g}$ ) ning elastsusmoodul ristikiudu ( $E_{c,90,g}$ ). Survetugevuse keskmiseks väärtuseks saadi  $4,23 \text{ N/mm}^2$  ning elastsusmooduli keskmiseks väärtuseks saadi  $247,17 \text{ N/mm}^2$ . Kuna survetugevuse tulemused olid ühtlased, siis saadi ka normatiivne survetugevus keskmisele sarnane -  $4,12 \text{ N/mm}^2$ . Vastavalt standardile EVS-EN 14080:2013, on kõigi liimpuidu klasside normatiivne survetugevus  $2,5 \text{ N/mm}^2$ . Järelikult on katsetega tõestatud, et halli lepa liimpuidu survetugevus vastab normile ja on isegi peaaegu poole suurem kui ette nähtud.

Võrdluseks tehti ka survetugevuskatsed halli lepa puidu väikeste katsekehadega. Survetugevuse määramisel kasutati kolme erinevat meetodikat: M1 – surudes katsekeha keskelt 20 mm laiuse terasprismaga ja katsekeha alune pind on täielikult toetatud; M2 – surudes katsekeha 20 mm laiuste terasprismadega kahelt poolt keskelt; M3 – surudes katsekeha mõlemalt poolt täisristlõike ulatuses. Katsed viidi läbi seadmega INSTRON 3369. Katsekehasid oli igas meetodikas 20 tükki mõõtudega  $20 \times 20 \times 60 \text{ mm}^3$ . Kirjeldatud meetodikatest andis kõige suurema survetugevuse meetod M1 -  $8,16 \text{ N/mm}^2$ . Suhteliselt kõrged olid ka katsetulemused meetodikaga M2. Kolmas meetodika oli kõige paremini võrreldav liimpuidu survekatsetega, kuna survet avaldati kogu katsekeha ülemise ja alumise pinna ulatuses. Meetodi M3 tulemus,  $5 \text{ N/mm}^2$ , on halli lepa liimpuidu keskmisest survetugevusest – milleks saadi  $4,23 \text{ N/mm}^2$  –  $0,77 \text{ N/mm}^2$  võrra väiksem.

Katsetulemuste kõrvutamisel standardis ette nähtud tugevusomadustega saab järeldada, et hallist lepast tehtud liimpuittalade tugevusomadused vastavad normidele ja on mõningatel juhtudel isegi kuni poole paremad. Ka liimpuidu tootmiseks kasutatud liim ja tootmismeetodid on halli lepa jaoks sobivad.

## Kasutatud kirjandus

- Aastaraamat. ("Mets 2014"). Mets 2014. Tallinn: Keskkonnaagentuur.
- Aosaar, J.** (2012). The Development and Biomass Production of Grey Alder Stand on Abandoned Agricultural Land in Relation to Nitrogen and Carbon Dynamics. (Doktoritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.
- Šumigin, D.** (2008). Saetööstuse tehnoloogia. Tallinn: TTÜ.
- Becker, H.** (2016). The Effect of Forest Management on the Carbon and Nitrogen Fluxes and Storages in Different Forest Ecosystems. (Doktoritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.
- Crocetti, R., Johanson, M., Johnsson, H., & Kliger, R.** (2011). Design of timber structures. Stockholm: Swedish wood.
- Durrant, R. C.** (2016). *Alnus incana* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. rmt: 1, European Atlas of Forest Tree Species. 200 lk. Luxemburg: EU Luxemburg.
- EVS-EN 14080:2013. (2013). Puitkonstruktsioonid. Laudliimpuit ja plankliimpuit. Nõuded. Eesti standardikeskus.
- EVS-EN 338: 2009. (2009). Ehituspuit. Tugevusklassid. Eesti standardikeskus.
- EVS-EN 384. (2010). Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Eesti standardikeskus.
- EVS-EN 408:2010. (2012). Puitkonstruktsioonid. Ehituspuit ja liimpuit. Mõnede füüsikaliste ja mehaaniliste omaduste määramine. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- Fink, G., Kohler, J., & Frangi, A.** (2013). Bending Tests on Glued Laminated Timber Beams with Well-Known Material Properties. Zürich: Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich.
- Garbett, J.** (2008). A CRITICAL ANALYSIS OF THE LEONARDO DA VINCI BRIDGE IN ÅS, NORWAY. Bridge engineering conference 2. Bath: University of Bath.
- Hani, M.** (2014). Kuuse- (*Picea abies*) ja männipuidu (*Pinus sylvestris*) tugevusparameetrite uurimine akustiliste mitte-purustavate ja purustavate meetoditega. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.
- ISO 3130. (1975). Wood - Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International standard, 2.
- ISO 3132. (1975). Wood - Testing in compression perpendicular to grain. International standard, 2.
- ISO 3133. (1975). Wood - Determination of ultimate strength in static bending. International standard, 2.
- Just, E.** (1. 12 2001. a.). Ehituspuidu tugevusklassidest. Ehitaja, lk 26-29.

- Just, A.** (1. 1 2003. a.). Liimpuit. Ehitaja , lk 44,45.
- Just, E. J., Õiger, K., Just, A.** (2015). Puit ja puidupõhised konstruktsioonid. Tallinn: TTÜ kirjastus.
- Just, E.** (2012). Puitkonstruktsioonid. Tallinn: Tallinn.
- Korsar, T.** (2014). Musta lepa (*Alnus glutinosa*) ja haavapuidu (*Populus tremula*) tugevusparameetrite uurimine akustiliste mittepurustavate ja purustavate meetoditega. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.
- Meusel, J. j.** (1998). Vergleichende Chorologie der Zentraleuropäischen Flora - Band I, II, III (Gustav Fischer Verlag, Jena, 1998). .: Gustav Fischer Verlag.
- Muraleedharan, A., & Reiterer, S. M.** (1. Aug. 2016. a.). Combined glued laminated timber using hardwood and softwood lamellas. Master's Thesis in Structural Engineering . Växjö , Växjö, Sweden: Faculty of Technology.
- Must, A., Nemvalts, M.** (1. 12 2002. a.). Ekslusiivne hoone liimpuidust. Ehitaja .
- Pavlovics, G., Antons, A., Dolacis, J., Cirule, D., Daugavietis, m.** (2010). comparison of the anatomical structure elements and density, bending and compression strength properties of the wood of different alder species growing in Latvia. Wood Structure and Properties '10 , 49-52.
- Riberholt, H.** (2008). European Spruce – picea abies graded by Chinese visual rules. Lyngby: Danmarks tekniske universitet, Department of Civil Engineering.
- Saarman, V.** (2006). Puiduteadus. Tartu: Eesti Metsaselts.
- Teder, M.** (2016). Puidu ja liimpuidu füüsikalise-mehaaniliste omaduste uurimine mittepurustavate meetoditega. (Dokoritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.
- Uri, V.** (12. 1 2004. a.). Halli lepa paremad ajad on ees. Eesti Mets , lk 24.
- Wood handbook.** (2010). Wood handbook. Madison: Forest Products Laboratory .

# Investigating the Strength Properties of Glue Laminated Timber Made of Grey Alder

## SUMMARY

Grey alder is a very widely spread species of tree in Estonia, however extremely undervalued. Taking into consideration the large resource of grey alder, it requires a new field of application. The current thesis investigates the suitability of making glue laminated timber out of grey alder, focusing on its strength properties at static bending, and also at compression perpendicular to grain. Moreover, the thesis concentrates on examining the strength properties of grey alder's clear wood and the connection with density and moisture, as these being the indicators that conclude the properties of glue laminated timber.

Tests on static bending and compression perpendicular to grain were carried out with glue laminated timber beams of grey alder according to the standard EVS-EN 408. 11 glue laminated timber beams with measurements of 95 x 150 x 3000 mm<sup>3</sup> were used in bending tests. Glue laminated timber was made out of 27 mm lamellas that belong to strength class D18. The adhesive used was the polyurethane-based Makroplast UR 7225.

Bending tests on glue laminated timber made of grey alder were carried out in the laboratory of the Estonian University of Life Sciences. The bending test followed the scheme of four bending points. Test results revealed the average bending strength to be (fm,g) 40,38 N/mm<sup>2</sup> and the characteristic value was (fm,g,k) 29,25 N/mm<sup>2</sup>. The results expose the bending strength properties of glue laminated timber made of grey alder to be stronger than predicted. Also, the mean value of bending strength is much higher from the mean value of glue laminated timber made of spruce, according to earlier researches on glue laminated timber. The only drawback of glue laminated timber made of alder, is the wide scale of variation of bending strength, yet that is due to the knots which have incurred the beam's tension zone.

In order to compare the bending strength of glue laminated grey alder with the non-glued timber, clear wood bending tests were carried out according to the international

standard ISO 3133. For test pieces, 20 details of knot-free clear wood were cut from grey alder with measurements of 20 x 20 x 280 mm<sup>3</sup>. Bending tests were carried out with the device INSTRON 3369 on the basis of three bending points method. Maximum bending strength and modulus of elasticity was calculated from the test results. Test results proved that the bending strength of grey alder is not homogeneous – minimum value of 57,14 N/mm<sup>2</sup> and maximum value of 103,03 N/mm<sup>2</sup>. Great differences in bending strength are in accordance with density variation.

Tests of compression perpendicular to grain of glue laminated grey alder were carried out with test pieces as large as 100 x 200 x 250 mm<sup>3</sup>. The test pieces were prepared similarly to the test pieces that were used in bending tests. Bending tests were carried out according to the standard EVS-EN 408. Pressure was evenly forced onto the glue laminated test piece for as long as the test piece shrunk by 20 mm. Stress-strain graphs were drawn from the test results which enabled to determine compression perpendicular to grain ( $f_{c,90,g}$ ) and also modulus of elasticity to grain ( $E_{c,90,g}$ ) of glue laminated timber. The mean value of the compression strength was tested to be 4,23 N/mm<sup>2</sup> and the mean value of modulus of elasticity was found out to be 247,17 N/mm<sup>2</sup>. As the results of the compression strength were even, the characteristic compression strength was also similar to the average indicator 4,12 N/mm<sup>2</sup>. According to the standard EVS-EN 14080, the characteristic compression strength of all classes of glue laminated timber is 2,5 N/mm<sup>2</sup>. Consequently, the tests have proven that the compression strength of glue laminated timber made of grey alder meets the standard and is almost twice as high.

In comparison, tests of compression strength of grey alder's small test pieces were executed. When determining compression strength, three different methodologies were being used: M1 – pressing the middle part of the test piece with a 20 mm wide steel prism whilst the ground of the test piece is fully supported; M2 – pressing the middle part of the test piece from both sides with two 20 mm wide steel prisms; M3 – pressing the test piece from both sides within the whole cross-section. Tests were carried out with the device Instron 3369. Each method held 20 test pieces with measurements of 20 x 20 x 60 mm<sup>3</sup>. The highest bending strength amongst the described methodologies belonged to method M1, scoring 8,16 N/mm<sup>2</sup>. Relatively high were the results with method M2. The third method was the one that can best be compared with the compression tests of glue laminated timber, as the pressure was forced on within the whole surface of both, the upper and the down

side of the test piece. The test result of the method M3 was  $5 \text{ N/mm}^2$  - being by  $0,77 \text{ N/mm}^2$  lower than the average compression strength of the glue laminated timber – the latter being  $4,23 \text{ N/mm}^2$ .

Comparing the test results to the standard strength properties, it can be concluded that the strength properties of glue laminated timber beams made of grey alder meet the standards and are even in some cases at higher ranking. Furthermore, the adhesive used and the production methods are suitable for grey alder.

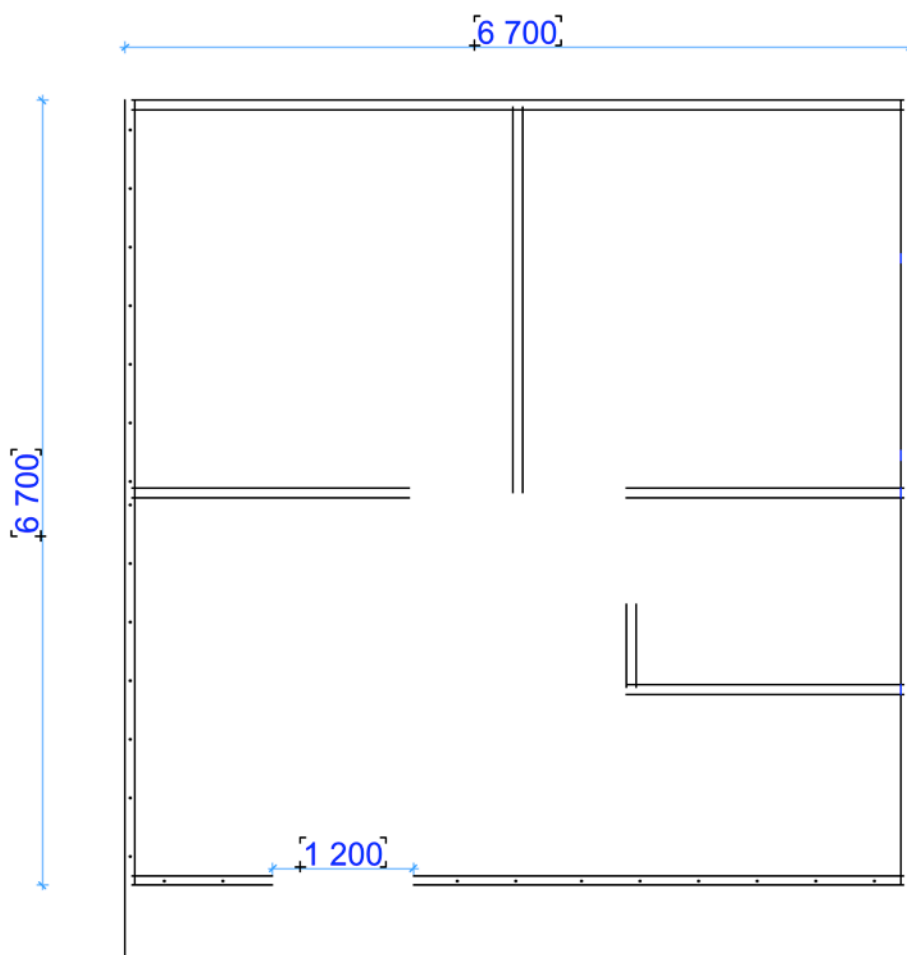
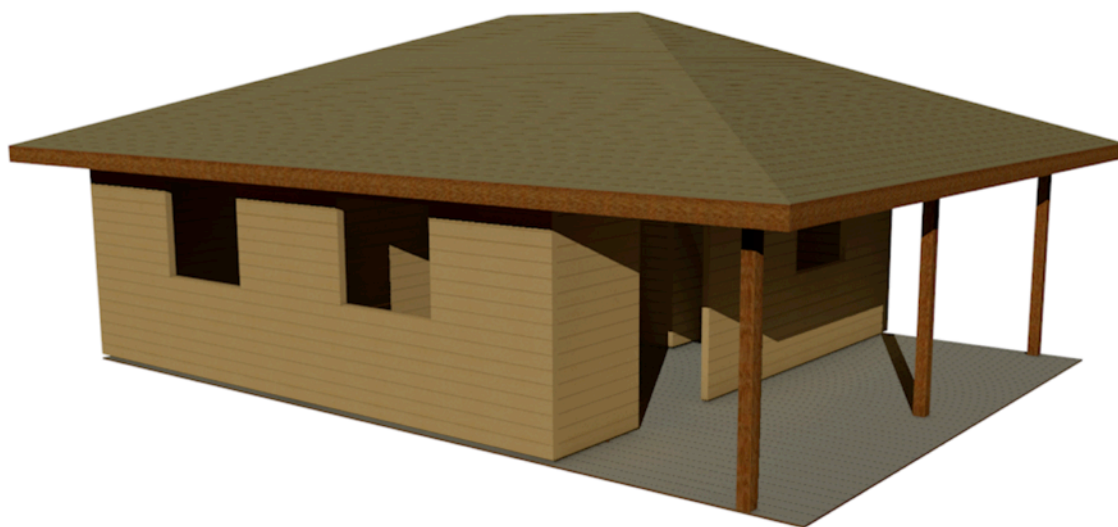
**LISAD**



**Lisa 1. Nordlum OÜ aiamajad ja paviljonid**



**Lisa 2. Nordlum OÜ suvemaja**



### Lisa 3. Töös kasutatud liimi andmed

Makroplast UR 7225

Lahustivaba ühekomponente niiskuse käes kõvenev liim

Alus: polüuretaan

Andmed seisuga 03.04.2000

Toote kirjeldus

Makroplast UR 7225 on lahustivaba ühekomponente niiskuse käes kõvenev polüuretaanalusel liim. Toatemperatuuril ja liitekohta nõutava niiskuse korral saavutatakse liite piisav esialgne tugevus umbes 1 tunniga.

Tehnilised andmed:

Värvus	Pruun
Lõhn	Nõrk, omapärane
konsistents	Viskoosne
Tihedus 20° C juures	Umbes 1,10 g/cm <sup>2</sup>
Viskoossus (Brookfield RVT, 20° C juures)	8 000±2500 mPa.s
Lahtiolekuaeg (20° C juures)	15-30 min*
Kõvenemisaeg	60-90 min*
Lõplik kõvenemisaeg	24 tundi*
Kulu	150-400 g/m <sup>2</sup> (sõltuvalt aluspinnast)
Tõmbetugevus (mõõdetuna puidu puiduga liimimisel)	
-40° C juures	6Mpa
20° C juures	7 Mpa
80° C juures	3 Mpa
Töötemperatuur	10-35° C
Kasutustemperatuur	-40° C kuni 80° C
Lühiajaline (kuni 1 tund)	100° C

### **Lisa 3. Jätk: töös kasutatud liimi andmed**

#### Liimimine

##### Märkus

Enne liimi kasutamist tuleb endale ohutuskaardi põhjal selgeks teha ohutusmeetmed ja – nõuanded. Ka eraldi tähistamist mittenõudvate toodete puhul tuleb järgida kemikaalide puhul üldiselt rakendatavaid ohutusmeetmeid.

#### Ettevalmistus liimimiseks

Liimitavad detailid peavad olema kuivad, tolmu- ja rasvavabad. Metallide puhul võib krundi kasutamine parandada nakkuvust ja/või pikaajalist stabiilsust. Plastikpindadel ei tohi olla eraldusainet. Naket saab parandada ka (materjalist sõltuvalt) karestamise abil.

#### Töötamine

Liim kantakse otse pudelist ühele liimitavale pinnale. Kui materjal ei ole piisavalt niiske või laseb niiskust läbi, peab jälgima, et niiskusesisaldus oleks õige. Kiiremaks kõvenemiseks võib liimiribale pärast pealekandmist pihustada veeudu.

Liimitavad detailid pannakse pärast liimi pealekandmist kohe kokku, jälgides, et surve oleks piisav. Kuna Macroplast U7225 kõveneb reageerides õhuga, tuleb liiminõu pärast liimi võtmist kohe sulgeda. Seetõttu soovitatakse avatud nõud võimalikult kiiresti ära kasutada.

#### Puhastamine

Värske kõvenemata liimi saab eemaldada puhastiga Macroplast B 8030. Kõvenenud liimi saab eraldada vaid mehaaniliselt.

#### Ladustamine

Toode on külmakartlik. Soovitatav ladustamistemperatuur on 15 - 20° C (mitte alla 10° C ja üle 50° C). Säilivusaeg on suletud originaalnõus 9 kuud.

#### Tarnitakse

30 kg.nõudes.

Ohujuhised/ohutusnõuanded/transportmärgistus  
vt ohutuskaardilt.

#### Lisa 4. Katsekehade kaalumis- ja mõõtmistulemuste andmed

**Tabel 4-1** Halli lepa liimpuittalade mõõtmis- ja kaalumistulemused

Tala nr.	Niiskussisaldus	b	h	l	Kaal
	[%]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]
HLLP/TP-1	12,13	94,31	149,60	2997	19,48
HLLP/TP-2	11,68	94,19	149,01	2999	20,09
HLLP/TP-3	11,23	94,02	149,31	2998	20,62
HLLP/TP-4	12,48	94,12	149,47	2999	19,53
HLLP/TP-5	11,28	94,13	149,82	2999	19,99
HLLP/TP-6	10,90	94,23	149,65	3000	20,29
HLLP/TP-7	10,28	94,24	149,68	3000	19,82
HLLP/TP-8	11,43	94,01	149,78	3000	20,33
HLLP/TP-9	11,60	94,18	149,56	2998	19,85
HLLP/TP-10	11,28	94,28	148,71	2998	20,13
HLLP/TP-11	11,88	94,05	149,73	3000	19,71

**Tabel 4-2** Liimpuit survekatsekehade andmed

Katsekeha nr	Kaal	Kaal	Kaal	Kaalumisega	Anduriga	
	04.05.17	12.05.17	14.05.17	niiskus	niiskus	Tihedus
	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
HLLP/SK-1	2206,2	2022,15	2020,6	9,19	8,5	420,67
HLLP/SK-2	2199,8	2015,7	2014,05	9,22	9,8	418,93
HLLP/SK-3	2195,1	2010,9	2008,95	9,27	9,6	417,40
HLLP/SK-4	2201,8	2018,25	2016,65	9,18	5,9	419,24
HLLP/SK-5	2131,95	1956,85	1955,9	9,00	9,4	415,54
HLLP/SK-6	2172,2	1989,3	1987,9	9,27	9,4	415,93
HLLP/SK-7	2179	1997,65	1995,9	9,17	10	418,04
HLLP/SK-8	2162,8	1983,45	1981,7	9,14	10,7	414,54
HLLP/SK-9	2149,8	1974,15	1972,65	8,98	8,6	417,46
HLLP/SK-10	2205,3	2031,45	2029,65	8,65	8,8	426,79
HLLP/SK-11	2141,4	1965,95	1954,35	9,57	8,1	414,12

#### Lisa 4. Jätk: katsekehade kaalumise- ja mõõtmistulemuste andmed

Tabel 4-3 Väikeste paindekatse katsekehade andmed

Kaalumine	03/05/17	06/05/17	07/05/17	Tihedus	w
	[g]	[g]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]
HLP-1	84,56	75,99	75,95	486	11,34
HLP-2	58,99	52,85	52,84	344	11,64
HLP-3	70,84	63,70	63,68	410	11,24
HLP-4	70,15	63,13	63,12	406	11,14
HLP-5	70,09	63,33	63,31	405	10,71
HLP-6	70,08	62,97	62,94	405	11,34
HLP-7	70,93	63,71	63,67	414	11,40
HLP-8	83,41	74,95	74,90	481	11,36
HLP-9	77,88	70,04	70,00	455	11,26
HLP-10	61,22	55,15	55,14	357	11,03
HLP-11	79,38	71,17	71,13	457	11,60
HLP-12	70,48	63,38	63,37	412	11,22
HLP-13	82,94	74,45	74,42	479	11,45
HLP-14	69,68	62,49	62,47	406	11,54
HLP-15	83,89	75,15	75,12	481	11,67
HLP-16	60,80	54,94	54,93	353	10,69
HLP-17	81,68	73,37	73,37	472	11,33
HLP-18	84,88	75,97	75,97	487	11,73
HLP-19	59,12	53,12	53,11	351	11,32
HLP-20	60,03	54,04	54,02	348	11,13

## Lisa 5. Purunemispildid



HLL/TP-1



HLL/TP-2



HLL/TP-3



**Lisa 5. Jätk: purunemispildid**



HLL/TP-4



HLL/TP-5



HLL/TP-6



## Lisa 5. Jätk: purunemispildid



HLL/TP-7



HLL/TP-8



HLL/TP-9

## Lisa 5. Jätk: purunemispildid



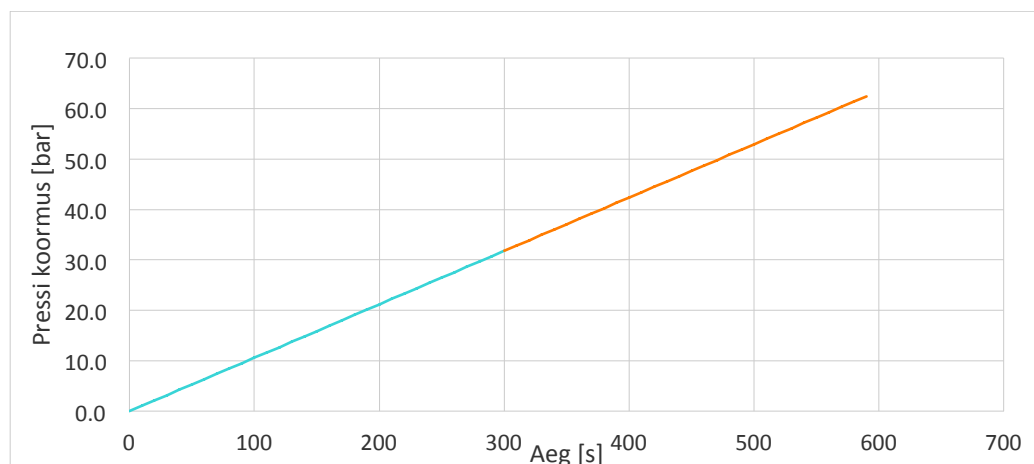
HLL/TP-10



HLL/TP-11

## Lisa 6. Liimpuittalade koormamisgraafik

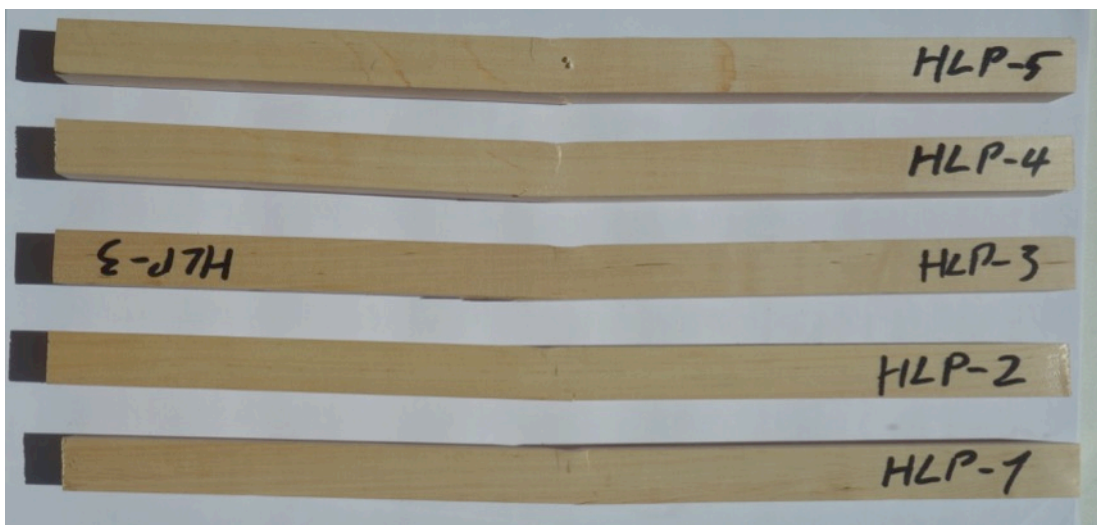
Aeg			Kell			Koormus						Aeg			Kell			Koormus					
s	min		15:00	bar	kN	def			s	min								bar	kN	def			
0	00:00		15:00:00	0,000	0,0	0,0			300	05:00		15:05:00	31,768	15,6	41,5								
10	00:10		15:00:10	1,059	0,5	1,4			310	05:10		15:05:10	32,827	16,1	42,9								
20	00:20		15:00:20	2,118	1,0	2,8			320	05:20		15:05:20	33,885	16,7	44,3								
30	00:30		15:00:30	3,177	1,6	4,1			330	05:30		15:05:30	34,944	17,2	45,6								
40	00:40		15:00:40	4,236	2,1	5,5			340	05:40		15:05:40	36,003	17,7	47,0								
50	00:50		15:00:50	5,295	2,6	6,9			350	05:50		15:05:50	37,062	18,2	48,4								
60	01:00		15:01:00	6,354	3,1	8,3			360	06:00		15:06:00	38,121	18,7	49,8								
70	01:10		15:01:10	7,412	3,6	9,7			370	06:10		15:06:10	39,180	19,3	51,2								
80	01:20		15:01:20	8,471	4,2	11,1			380	06:20		15:06:20	40,239	19,8	52,6								
90	01:30		15:01:30	9,530	4,7	12,4			390	06:30		15:06:30	41,298	20,3	53,9								
100	01:40		15:01:40	10,589	5,2	13,8			400	06:40		15:06:40	42,357	20,8	55,3								
110	01:50		15:01:50	11,648	5,7	15,2			410	06:50		15:06:50	43,416	21,3	56,7								
120	02:00		15:02:00	12,707	6,2	16,6			420	07:00		15:07:00	44,475	21,9	58,1								
130	02:10		15:02:10	13,766	6,8	18,0			430	07:10		15:07:10	45,534	22,4	59,5								
140	02:20		15:02:20	14,825	7,3	19,4			440	07:20		15:07:20	46,593	22,9	60,9								
150	02:30		15:02:30	15,884	7,8	20,7			450	07:30		15:07:30	47,651	23,4	62,2								
160	02:40		15:02:40	16,943	8,3	22,1			460	07:40		15:07:40	48,710	23,9	63,6								
170	02:50		15:02:50	18,002	8,8	23,5			470	07:50		15:07:50	49,769	24,5	65,0								
180	03:00		15:03:00	19,061	9,4	24,9			480	08:00		15:08:00	50,828	25,0	66,4								
190	03:10		15:03:10	20,120	9,9	26,3			490	08:10		15:08:10	51,887	25,5	67,8								
200	03:20		15:03:20	21,178	10,4	27,7			500	08:20		15:08:20	52,946	26,0	69,2								
210	03:30		15:03:30	22,237	10,9	29,0			510	08:30		15:08:30	54,005	26,5	70,5								
220	03:40		15:03:40	23,296	11,5	30,4			520	08:40		15:08:40	55,064	27,1	71,9								
230	03:50		15:03:50	24,355	12,0	31,8			530	08:50		15:08:50	56,123	27,6	73,3								
240	04:00		15:04:00	25,414	12,5	33,2			540	09:00		15:09:00	57,182	28,1	74,7								
250	04:10		15:04:10	26,473	13,0	34,6			550	09:10		15:09:10	58,241	28,6	76,1								
260	04:20		15:04:20	27,532	13,5	36,0			560	09:20		15:09:20	59,300	29,1	77,5								
270	04:30		15:04:30	28,591	14,1	37,3			570	09:30		15:09:30	60,359	29,7	78,8								
280	04:40		15:04:40	29,650	14,6	38,7			580	09:40		15:09:40	61,417	30,2	80,2								
290	04:50		15:04:50	30,709	15,1	40,1			590	09:50		15:09:50	62,476	30,7	81,6								
300	05:00		15:05:00	31,768	15,6	41,5			600	10:00		15:10:00	63,535	31,2	83,0								
									610	10:10		15:10:10	64,594	31,7	84,4								



Joonis 6-1. Liimpuittalade koormamisgraafik



**Lisa 7. Väikeste katsekehade paindekatsete purunemispildid**



(Foto Martti-Jaan Miljan)

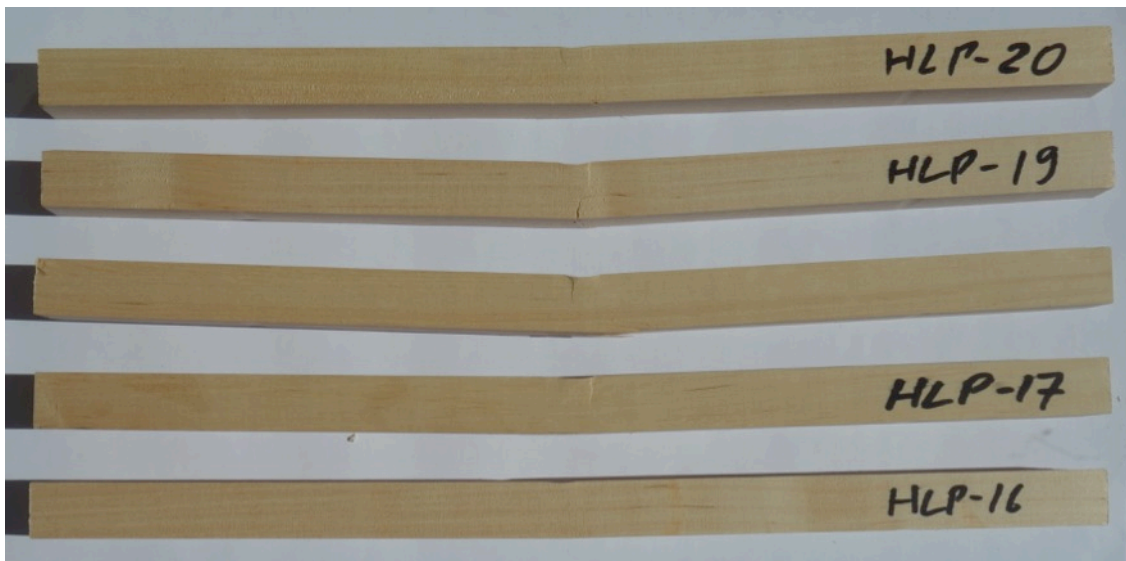


(Foto Martti-jaan Miljan)



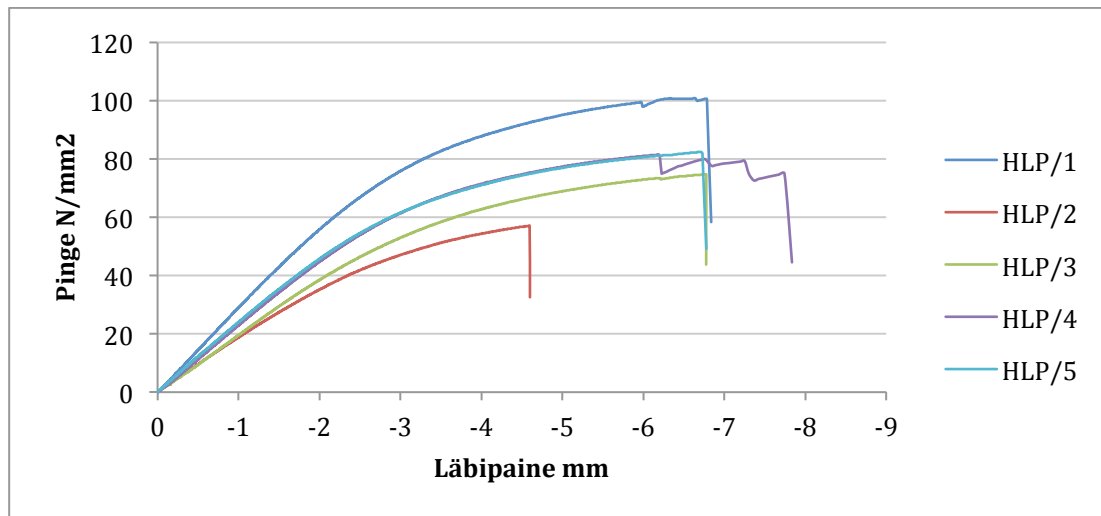
(Foto Martti-Jaan Miljan)

**Lisa 7. Jätk: väikeste katsekehade paindekatsete purunemispildid**

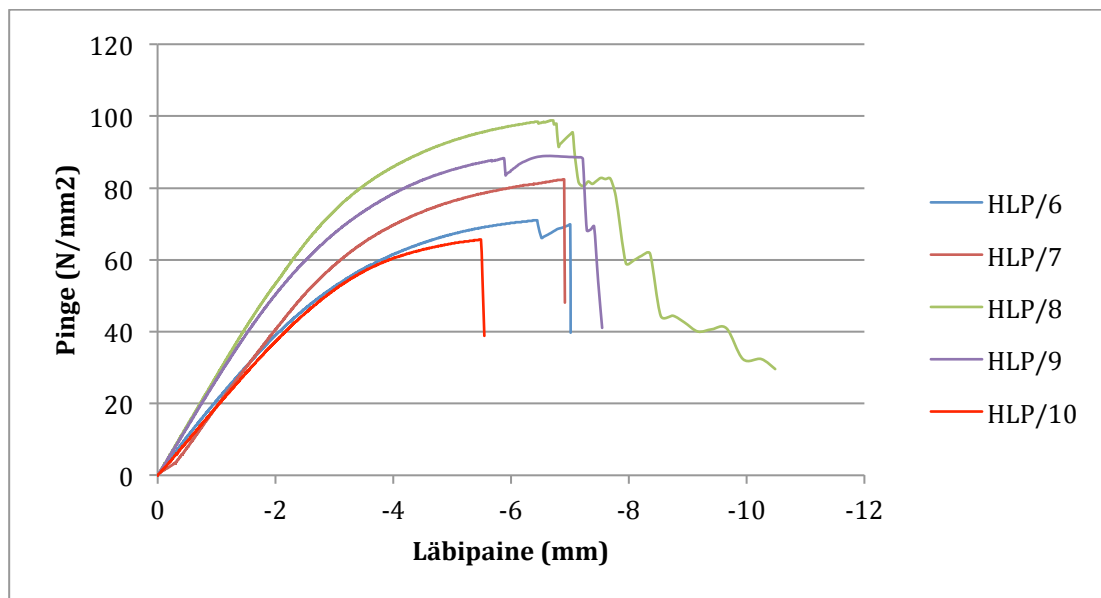


(Foto Martti-Jaan Miljan)

## Lisa 8. Väikeste katsekehade paindekatsete pinge-läbipainde graafikud

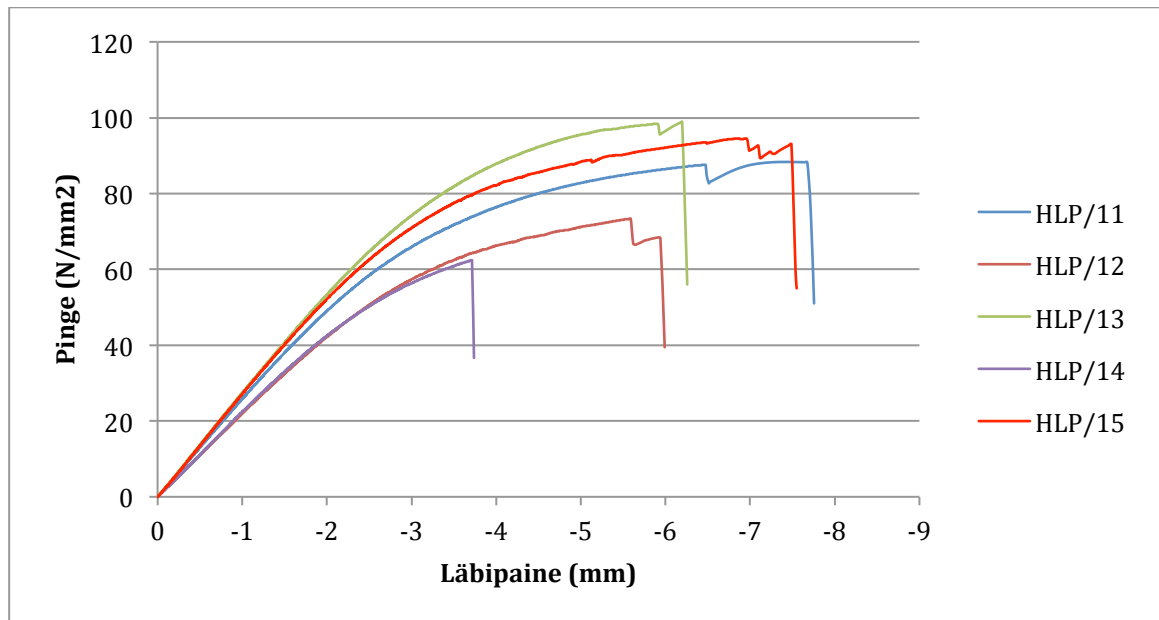


Joonis 8-1. Katsekehad 1-5

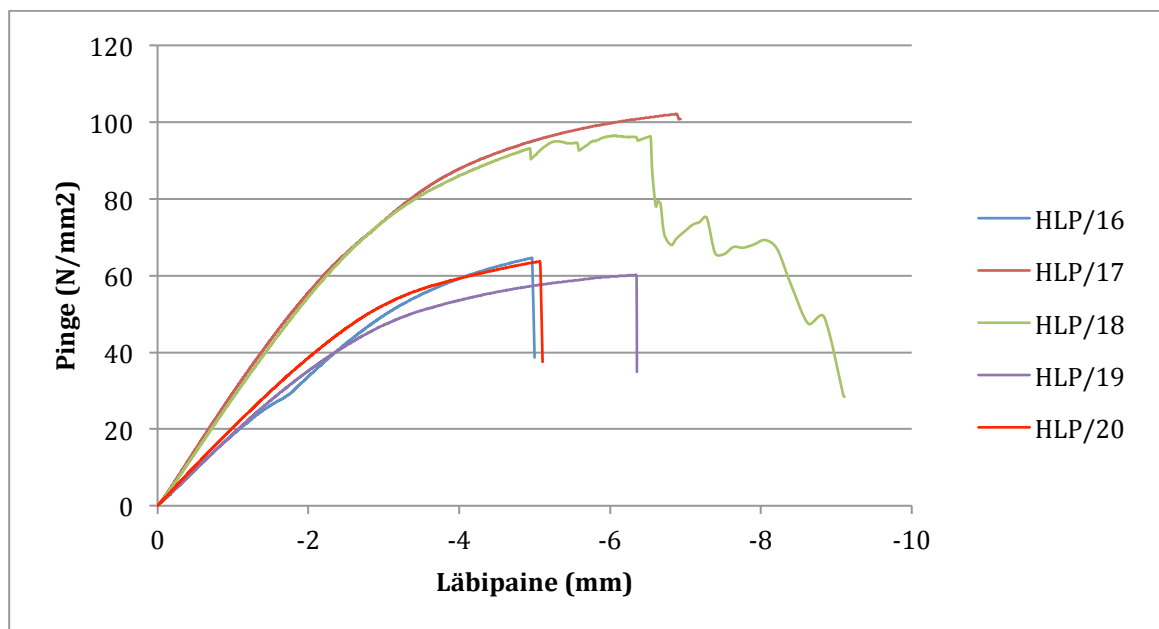


Joonis 8-2. Katsekehad 6-10

### Lisa 8. Jätk: väikeste katsekehade paindekatsete pingeläbipainde graafikud



Joonis 8-3. Katsekehad 11-15



Joonis 8-4. Katsekehad 16-20

### Lisa 9. Halli lepa puidu survekatsete tulemused

a)

NR	Survetugevus [N/mm <sup>2</sup> ]	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]	w [%]
HLS1/1	9,45	528	10,64
HLS1/2	5,78	381	10,55
HLS1/3	7,52	443	11,10
HLS1/4	6,22	391	10,32
HLS1/5	8,82	482	10,92
HLS1/6	11,71	521	10,97
HLS1/7	7,77	471	10,76
HLS1/8	6,52	445	10,81
HLS1/9	7,38	458	10,87
HLS1/10	8,58	459	10,92
HLS1/11	7,89	452	10,53
HLS1/12	6,33	378	10,03
HLS1/13	10,52	505	9,77
HLS1/14	10,03	398	10,23
HLS1/15	7,56	442	10,82
HLS1/16	8,20	440	10,96
HLS1/17	9,51	484	11,54
HLS1/18	8,10	478	10,20
HLS1/19	5,72	379	10,65
HLS1/20	9,52	493	10,51
Keskmine	<b>8,16</b>	<b>451</b>	<b>10,65</b>
5%	5,77		

b)

NR	Survetugevus [N/mm <sup>2</sup> ]	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]	w [%]
HLS2/1	4,83	386	10,64
HLS2/2	6,54	440	10,55
HLS2/3	6,80	473	11,10
HLS2/4	8,22	437	10,32
HLS2/5	5,64	448	10,92
HLS2/6	8,30	522	10,97
HLS2/7	7,76	455	10,76
HLS2/8	8,02	445	10,81
HLS2/9	6,23	455	10,87
HLS2/10	4,61	389	10,92
HLS2/11	8,71	445	10,53
HLS2/12	5,69	441	10,03
HLS2/13	7,50	445	9,77
HLS2/14	8,84	492	10,23
HLS2/15	8,33	450	10,82
HLS2/16	6,60	428	10,96
HLS2/17	7,34	455	11,54
HLS2/18	7,73	437	10,20
HLS2/19	7,71	443	10,65
HLS2/20	8,47	436	10,51
keskmine	<b>7,19</b>	<b>446</b>	<b>10,65</b>
5%	4,82		

Joonis L9-1 Survekatsete tulemused väikeste katsekehade a - M1; b - M2

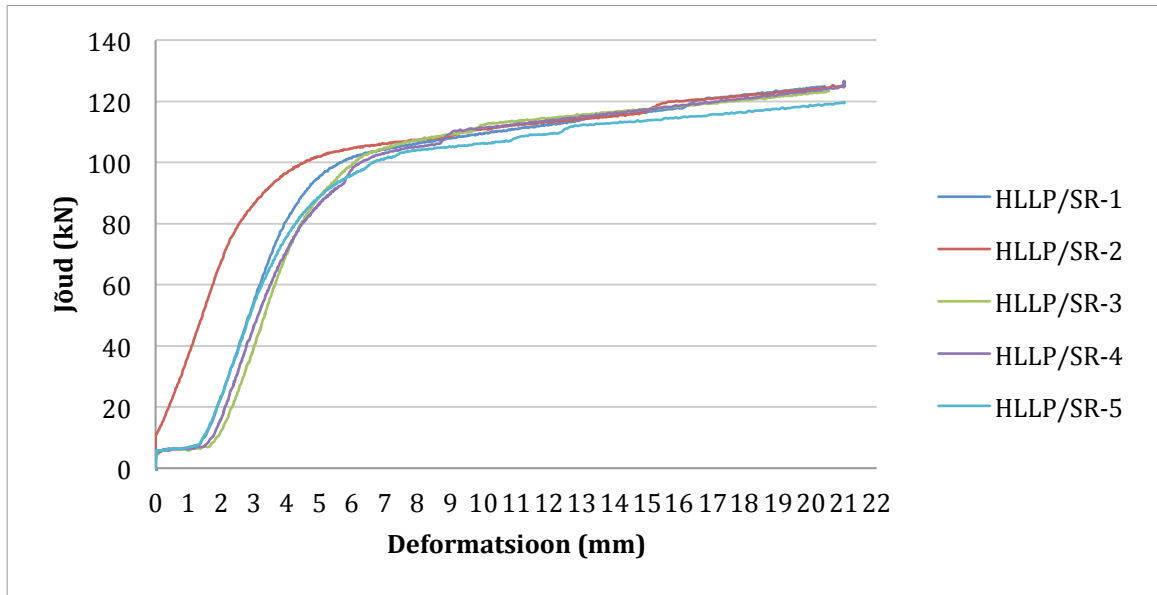


**Lisa 9. Jätk: halli lepa survekatsete tulemused**

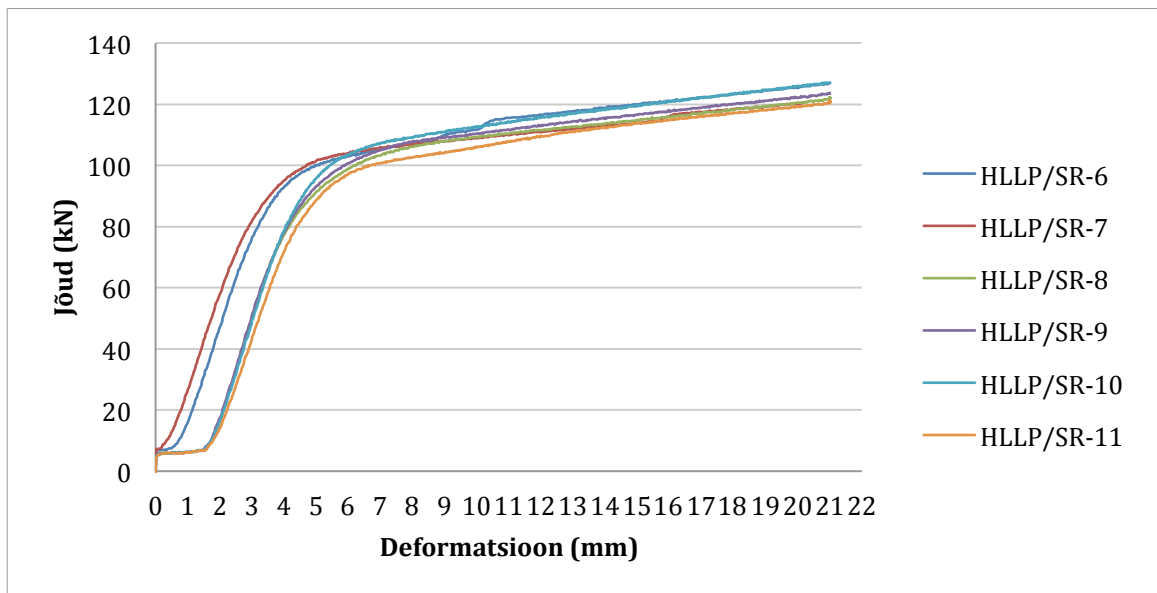
NR	Survetugevus [N/mm <sup>2</sup> ]	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]	w [%]
HL3/1	4,05	439	10,98
HL3/2	3,82	454	11,21
HL3/3	6,23	433	10,66
HL3/4	4,74	424	11,25
HL3/5	3,84	439	11,16
HL3/6	5,07	550	11,36
HL3/7	5,70	478	11,44
HL3/8	5,21	450	10,68
HL3/9	5,79	482	10,97
HL3/10	6,27	517	11,09
HL3/11	5,04	530	10,86
HL3/12	4,02	455	10,67
HL3/13	5,07	546	10,66
HL3/14	3,26	380	10,50
HL3/15	7,05	540	10,86
HL3/16	6,24	548	10,35
HL3/17	4,54	450	10,26
HL3/18	5,16	527	10,99
HL3/19	4,57	432	11,17
HL3/20	4,34	455	11,19
Keskmine	5,00	477	10,92
5%	3,80		

**Joonis L9-2.** Survekatsete tulemused väikeste katsekehadega M3

## Lisa 10 Liimpuidu survekatsete graafikud



Joonis10-1. Liimpuidu survekatsed 1-5



Joonis 10-2. Liimpuidu survekatsed 6-11

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Taavet Tamm,  
(sünnipäev 12.03.1981)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö  
Hallist lepast liimpuittalade tugevusomaduste uurimine,  
mille juhendaja on Martti-Jaan Miljan,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega  
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_

allkiri

Tartu, \_\_\_\_\_

---

**Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)